

---

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: M2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3902T005 – Automatické řízení a inženýrská informatika

**Softwarová podpora určování účinnosti ORC  
technologie výroby tepla a elektrické energie na  
základě měření**

**Software support of efficiency determination of  
ORC technology production of heat and electric  
energy based on measurement**

**Diplomová práce**

Autor:	<b>Pavel Zamouřil</b>
Vedoucí práce:	Doc.Ing. Osvald Modrlák, CSc.
Konzultant:	Ing. Lukáš Hubka

**V Liberci 10. 9. 2007**

## **Zadání diplomové práce**

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé DP a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum

Podpis

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Doc. Ing. Osvaldu Modrlákovi, CSc. a konzultantovi Ing. Lukáši Hubkovi za jejich odborné vedení. Dále děkuji své rodině a všem blízkým za podporu a trpělivost, které se mi od nich dostávalo nejen při tvorbě této práce, ale i po celou dobu studia.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se věnuje problematice výroby elektrické energie a tepla za pomoci technologie Organického Rankinova cyklu (ORC). Tato technologie využívá narozdíl od klasického Rankinova cyklu jako pracovní médium organické látky. V první části je popsán obecný princip ORC, jeho výhody a nevýhody, dále jsou uvedeny základní informace o jeho současném využití v České republice. Převážná část práce se dále zabývá již konkrétní realizací technologie využívající ORC ve spojení se spalováním biomasy, provozované v německém městě Schöneck. Na základě technických výkresů byl stanoven postup pro výpočet účinnosti celé této technologie a účinnosti kotle na biomasu. S využitím těchto znalostí byl vytvořen program, který umožňuje zpracovat hodnoty získané měření na provozované technologii. Pro uživatelem vybraný časový úsek na základě těchto naměřených hodnot program provádí výpočet požadovaných účinností.

Klíčová slova: Organický Rankinův cyklus, účinnost, biomasa

## **Abstract**

This diploma thesis deals with a problematic of production of heat and electrical energy with the help of Organic Rankin Cycle (ORC) technology. This technology makes use of working medium organic medium instead of water, usually used in Rankin process. In the first part of this work, there is common principle of ORC with his advantages and disadvantages described, below there is information about its present usage in Czech Republic. Greater part of this work deals with a concrete realisation of technology in German city Schöneck, making use of connection of ORC technology and combustion of biomass. In terms of technical drawing it was procedure for calculation of system efficiency and boiler efficiency determined. With the usage of this knowledge program for the efficiency determination was created. This program uses values measured on the real technology for determination of efficiency of technology for time interval specified by user.

Keywords: Organic Rankin Cycle, efficiency, biomass

# Obsah

<b>Zadání diplomové práce .....</b>	<b>2</b>
<b>Prohlášení .....</b>	<b>3</b>
<b>Poděkování .....</b>	<b>4</b>
<b>Abstrakt .....</b>	<b>5</b>
<b>Obsah .....</b>	<b>6</b>
<b>Seznam ilustrací .....</b>	<b>8</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>9</b>
<b>Seznam vybraných použitých symbolů a zkratk.....</b>	<b>10</b>
<b>0 Úvod .....</b>	<b>12</b>
<b>1 Princip Organického Rankinova cyklu.....</b>	<b>13</b>
1.1 Princip ORC.....	13
1.1.1 Ekonomizéry .....	14
1.1.2 Tok energie .....	15
1.1.3 Důvody využití vloženého okruhu.....	16
1.1.4 Pracovní médium ORC .....	17
1.2 Výhody a nevýhody ORC.....	18
1.2.1 Hlavní výhody ORC .....	19
1.2.2 Hlavní nevýhody ORC.....	19
1.3 Kogenerace .....	19
<b>2 ORC v České republice .....</b>	<b>21</b>
2.1 Teplárna Sever ve městě Třebíč.....	21
2.1.1 Základní údaje.....	21
2.1.2 Technické údaje technologie instalované v Třebíči.....	21
2.1.3 Provedení .....	22
2.2 Teplárna na biomasu v Trhových Svinech .....	23
2.2.1 Základní údaje.....	23
2.2.2 Technické údaje technologie instalované v Trhových Svinech.....	23
2.2.3 Provedení .....	24
<b>3 ORC technologie ve městě Schöneck .....</b>	<b>25</b>
3.1 Základní údaje.....	25
3.2 Charakteristické znaky technologie .....	25
3.2.1 Přikládání paliva do kotle .....	26

3.2.2	Ekonomizéry .....	26
3.2.3	Okruh nouzového chlazení .....	27
3.2.4	Teplárenský režim.....	28
3.3	Technické výkresy a zjednodušená schémata.....	28
3.3.1	Podklady od zadavatele zakázky .....	28
3.3.2	Zjednodušená schémata technologie .....	29
<b>4</b>	<b>Analýza a výpočet účinnosti technologických celků .....</b>	<b>36</b>
4.1	Účinnosti na základě měřených veličin .....	39
4.1.1	Celková účinnost technologie.....	40
4.1.2	Účinnost kotle na biomasu.....	43
4.1.3	Účinnost kotel na biomasu s ekonomizéry .....	46
4.2	Účinnost ORC modulu na základě navrhovaných měření.....	47
4.3	Příklad výpočtu účinností na základě naměřených dat.....	51
4.3.1	Výpočet celkové účinnosti technologie pro zvolené časové období ...	53
4.3.2	Výpočet účinnosti kotle na biomasu pro zvolené časové období.....	53
4.3.3	Výpočet účinnosti kotle s ekonomizéry pro zvolené časové období ...	54
4.4	Chyby měření, statistická regulace .....	55
4.4.1	Zákon hromadění chyb (chyby nepřímých měření).....	56
4.4.2	Statistická regulace .....	57
<b>5</b>	<b>Zpracování naměřených dat, software .....</b>	<b>62</b>
5.1	Postup výpočtu účinnosti za pomoci programu .....	63
5.1.1	Hardwarové a softwarové nároky .....	63
5.1.2	Zadání časového období pro výpočet a příprava dat .....	64
5.1.3	Eliminace hrubých chyb měření, statistická regulace.....	65
5.1.4	Výpočet účinností na základě připravených dat a zobrazení výsledků	65
5.1.5	Příklady výsledků získaných výpočtem a jejich analýza.....	66
<b>Závěr</b>	<b>.....</b>	<b>68</b>
<b>Použitá literatura</b>	<b>.....</b>	<b>70</b>
<b>Přílohy</b>	<b>.....</b>	<b>72</b>

## Seznam ilustrací

<b>Obrázek 1.1</b> Výroba elektrické energie a tepla z biomasy ORC technologií.....	13
<b>Obrázek 1.2</b> Příklad T-s diagramu s vyznačením vlivu zapojení ekonomizéru .....	15
<b>Obrázek 1.3</b> Ukázka energetického toku technologií výroby tepla a elektrické energie.....	16
<b>Obrázek 1.4</b> ORC cyklus v T-s diagramu pro médium s diagramem tvaru zvonu a se vstupem nasycené páry do turbíny .....	18
<b>Obrázek 1.5</b> ORC cyklus v T-s diagramu pro médium s diagramem tvaru zvonu a se vstupem přehřáté páry do turbíny .....	18
<b>Obrázek 1.6</b> ORC cyklus v T-s diagramu pro médium s diagramem s převíslou křivkou a se vstupem nasycené páry do turbíny .....	18
<b>Obrázek 1.7</b> T-s diagram pro ORC okruh s nadkritickým tlakem .....	18
<b>Obrázek 2.1</b> Příprava ORC modulu v Trhových Svinech .....	23
<b>Obrázek 3.1</b> Instalace kotle na biomasu s ekonomizéry - Schöneck.....	26
<b>Obrázek 3.2</b> Příklad využití zbytkového tepla spalín k předehřevu spalného vzduchu ekonomizérem spaliny/vzduch .....	27
<b>Obrázek 3.3</b> Zjednodušené schéma termoolejového okruhu.....	30
<b>Obrázek 3.4</b> Zjednodušené schéma sekundárního okruhu – ORC .....	31
<b>Obrázek 3.5</b> Zjednodušené schéma vodního okruhu.....	32
<b>Obrázek 4.1</b> Schéma kotle a ekonomizérů s vyznačením tepelných výkonů.....	46
<b>Obrázek 4.2</b> Zjednodušené schéma termoolejového okruhu s požadovanými měřicími místy .....	49
<b>Obrázek 4.3</b> Ukázka dynamického diagramu EWMA aplikovaného na konkrétní naměřená data .....	61
<b>Obrázek 5.1</b> Uživatelské rozhraní programu pro výběr časového období pro výpočet.....	64



## Seznam tabulek

<b>Tabulka 2.1</b> Výkonové parametry technologie umístěné ve městě Třebíč .....	22
<b>Tabulka 2.2</b> Výkonové parametry technologie umístěné ve městě Trhové Sviny .....	24
<b>Tabulka 3.1</b> Výkonové parametry technologie umístěné v německém městě Schöneck .....	25
<b>Tabulka 3.2</b> Označení druhů médií ve schématech na obrázcích 3.3 - 3.5 .....	34
<b>Tabulka 3.3</b> Označení čidel ve schématech, výpočtech, technických výkresech, umístění ve zdroji dat .....	35
<b>Tabulka 4.1</b> Definice pojmů výhřevnost, spalné teplo a kondenzační teplo .....	38
<b>Tabulka 4.2</b> Význam značek použitých ve vzorci (4.9) pro výpočet výhřevnosti .....	41
<b>Tabulka 4.3</b> Základní charakteristika dřevní štěpky – nasekaný dřevní odpad z pilařských provozů .....	42
<b>Tabulka 4.4</b> Označení navrhovaných čidel ve schématech a výpočtech .....	48
<b>Tabulka 4.5</b> Průměrné hodnoty vybraných veličin naměřených dne 31. 3. 2007 v čase 18:00 - 20:00 na technologii ve městě Schöneck .....	52
<b>Tabulka 5.1</b> Účinnosti vypočítané za náhodně vybraná období .....	66

## Seznam vybraných použitých symbolů a zkratk

$c$  [J/kg/K] – měrná tepelná kapacita

*EKO* – ekonomizér

*EWMA* – ang. *Exponentially Weighted Moving Average*, typ statistické regulace

$F$  [m<sup>3</sup>/s, m<sup>3</sup>/h] – objemový průtok

$H$  [%] – obsah vodíku v řevní štěpce

$koef = \frac{P1}{2875} [ \ ]$  - pomocný koeficient pro výpočet

$m$  [kg] – hmotnost

*Matlab toolbox* – aplikační knihovna programu Matlab

$P$  [J/s] – výkon

*ORC* – Organický rankinův cyklus

$Q$  [J] – teplo

$Q_{IN}$  [J] – teplo přivedené do systému

$\dot{Q}_{in}$  [J/s] – vstupní tepelný výkon

$\dot{Q}_{out}$  [J/s] – výstupní tepelný výkon

$q_{spal}$  [J/kg] – spalné teplo dřevní štěpky

$q_v$  [J/kg] – výhřevnost dřevní štěpky

$Q_{U\check{Z}}$  [J] – užitečné teplo

$s$  [J/kg/K] – entropie

$T$  [°C, K] – teplota

$\dot{V}$  [m<sup>3</sup>/s] – objemový průtok

$w$  [%] - vlhkost dřevní štěpky

$\rho_D = 314 \text{ kg/m}^3$  – měrná hmotnost dřevní štěpky [15]

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] – hustota

$\eta$  [ ] – účinnost

$\tau$  [s] – čas

### **Tepelné výkony**

$P_{Qeko} [J/s]$  – celkový tepelný výkon ekonomizérů 1 a 2

$P_{Qeko1} [J/s]$  – tepelný výkon ekonomizéru č. 1

$P_{Qeko2} [J/s]$  – tepelný výkon ekonomizéru č. 2

$P_{el} [J/s]$  – elektrický výkon generátoru

$P_Q [J/s]$  – tepelný výkon obecně

$P_{QD} [J/s]$  - tepelný příkon kotle na biomasu ve formě dřevní štěpky

$P_{QK} [J/s]$  - tepelný výkon kotle na biomasu do termooleje

$P_{QORCin} [J/s]$  – tepelný výkon termooleje předávajícího teplo do ORC zařízení

$P_{QORCout} [J/s]$  – tepelný výkon kondenzátoru ORC

$P_{QP} [J/s]$  - tepelný výkon plynového kotle

$P_{QR} [J/s]$  – tepelný výkon kotle na biomasu chlazením roštu

$P_{QTS} [J/s]$  – tepelný výkon topného systému

$P_{Qvzduch} [J/s]$  – tepelný výkon přehřevu spalovacího vzduchu (výměník termoolej/spalovací vzduch)

### **Účinnosti**

$\eta_{celk} [ ]$  - celková účinnost systému

$\eta_k [ ]$  - účinnost samotného kotle

$\eta_{KE} [ ]$  - účinnost kotle s ekonomizéry

$\eta_{ORC} [ ]$  - účinnost ORC zařízení

# 0 Úvod

Stále rostoucí požadavky společnosti na snižování emisí ovlivňujících naše životní prostředí a hrozba rychlého vyčerpávání zdrojů fosilních paliv - to jsou hlavní důvody, proč eliminovat množství energie vyráběné v klasických elektrárnách spalujících fosilní paliva. Zároveň je ovšem nutné hledat způsoby, jak výrobní kapacitu těchto v současné době stále rozšířených zdrojů energie postupně nahradit takovými technologiemi, jejichž vliv na životní prostředí nebude tak výrazný, jako je to právě u elektráren spalujících fosilní paliva.

Jako řešení se nabízí například využití energie větrné, vodní nebo sluneční. Jak se ovšem ukazuje, v neposlední řadě je, vzhledem k vzrůstajícímu množství nevyužité zemědělské půdy, možné využít jako ekologického obnovitelného zdroje energie biomasu.

Ve spojení s výrobou elektrické energie a tepla ve spalovnách na biomasu se jako vhodné řešení nabízí využití Organického Rankinova cyklu, tzv. ORC. Dle dosavadních zkušeností dosahuje tato technologie vyšší účinnosti, než je tomu u do dnešní doby velmi rozšířeného Rankin – Clausiova cyklu, a poskytuje i další výhody. Mezi ně bezesporu patří relativní nenáročnost na obsluhu a oproti klasickým technologiím nižší náklady na provoz.

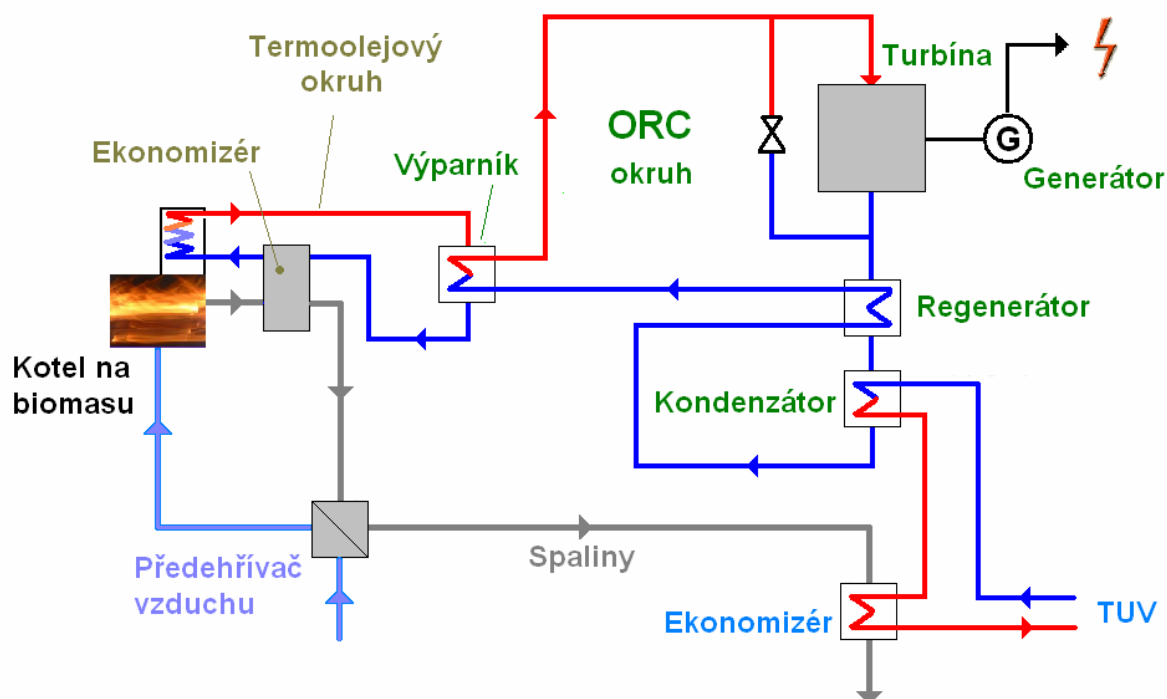
Tato diplomová práce si klade za cíl podat informace o principu technologie ORC, jejích výhodách i nevýhodách, a také poskytnout základní přehled o rozšířenosti ORC v České republice. Dále se zabývá popisem konkrétní technologie umístěné do německého městečka Schöneck a výpočtem její účinnosti z naměřených dat na základě informací poskytnutých místním provozovatelem technologie. Součástí předložené práce je software pro výpočet účinnosti ORC technologie ve městě Schöneck na základě naměřených dat. Důležitou součástí této práce je také zhodnocení získaných výsledků a jejich porovnání s předpokládanými hodnotami.

# 1 Princip Organického Rankinova cyklu

Přibližně v polovině 19. století pracoval Skot William John Macquorn Rankine na vylepšení technologie výroby elektrické energie. Výsledkem jeho práce bylo vyvinutí parního procesu, u kterého je místo vodní páry využíváno médium, které se odpařuje při nižších teplotách a tlacích, než do této doby využívaná voda. Jeho vynález přispěl k tomu, že bylo vůbec poprvé možné využít nízkopotenciální, např. geotermální teplo k výrobě elektrické energie. Proces, který vynalezl, je nazýván podle jeho jména, tedy *ang. Organic Rankine Cycle* - organický Rankinův cyklus (ORC).

## 1.1 Princip ORC

Základní princip technologie ORC ve spojení se spalováním biomasy je znázorněn ve schématu na obrázku 1.1.



Obrázek 1.1 Výroba elektrické energie a tepla z biomasy ORC technologií

V kotli na biomasu dochází k ohřevu pracovní látky v tzv. primárním okruhu, kterou je termoolej. Jeho teplota při výstupu z kotle se při běžném provozu pohybuje mezi 300 – 330 stupni Celsia, i přesto termoolej zůstává v celém primárním okruhu v kapalné formě (to je dáno jeho chemickým složením, resp. jeho vysokou teplotou

varu). Termoolej vystupující z kotle je dále přiváděn do výparníku, ve kterém dochází k předávání tepla do sekundární okruhu s ORC médiem.

V sekundárním okruhu jsou jako pracovní médium používány organické látky, kterými se blíže zabývá kapitola 1.2. Vlivem tepla získávaného z termooleje dochází ve výparníku k přechodu tohoto pracovního média z kapalně fáze na fázi plynou.

ORC médium v plyně fázi je následně přiváděno k turbíně, která pohání elektrický generátor, a dále do regenerátoru. Zde je část zbytkového tepla předána pracovnímu médiu před výparník. Z regenerátoru médium proudí dále do kondenzátoru, ve kterém je z něj odebráno další teplo, čímž dojde k jeho zkapalnění. Odebrané teplo je za pomoci vody jako teplonosného média předáváno dále a využíváno k vytápění objektů, případně ohřevu teplé užitkové vody apod.

### 1.1.1 Ekonomizéry

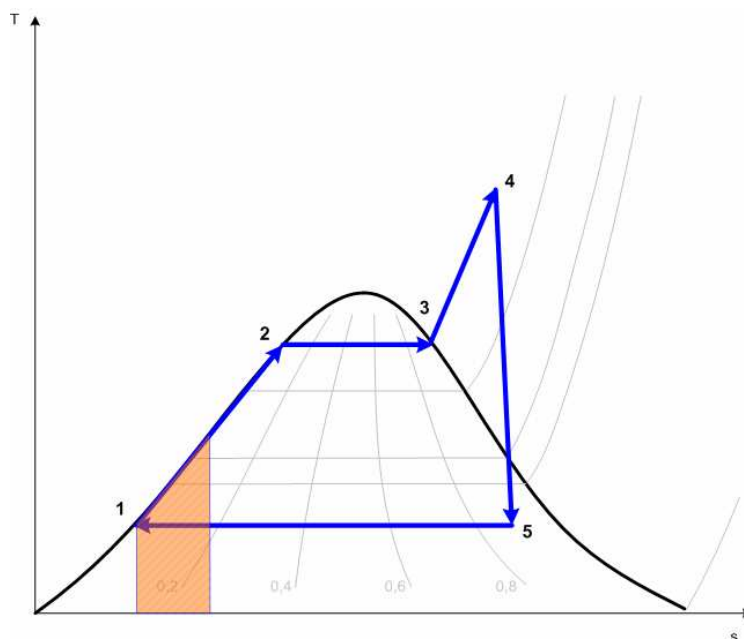
Účinnost celé technologie značným způsobem zvyšují také ekonomizéry, které odebírají část z „odpadního“ tepla spalin a vracejí ho do systému, kde je dále využíváno. Spaliny vystupující z kotle bývají nejprve vedeny do ekonomizéru, kde je z nich odebírána část tepla, které je předáváno do termooleje v primárním okruhu.

Dále je část tepla zbylého ve spalinách využívána za pomoci dalšího výměníku k předehřevu spalovacího vzduchu vedeného do kotle. Spalovací vzduch je možné předehřívát také teplem z termooleje. Využitím některé z těchto možností předehřevu spalovacího vzduchu je možné zvyšovat účinnost kotle na biomasu v řádu jednotek procent.

Posledním krokem využití zbytkového tepla je výměník spaliny – topná voda, kde dochází k odebrání další části tepla spalin, tentokrát do topné vody dále vedené do topného systému.

Spaliny před vstupem do komínu procházejí filtry, aby okolní životní prostředí bylo provozem spalovny co nejméně zatíženo.

Vliv zapojení ekonomizéru do systému je možné přehledně znázornit na příkladu T-s diagramu (viz obrázek 1.2).



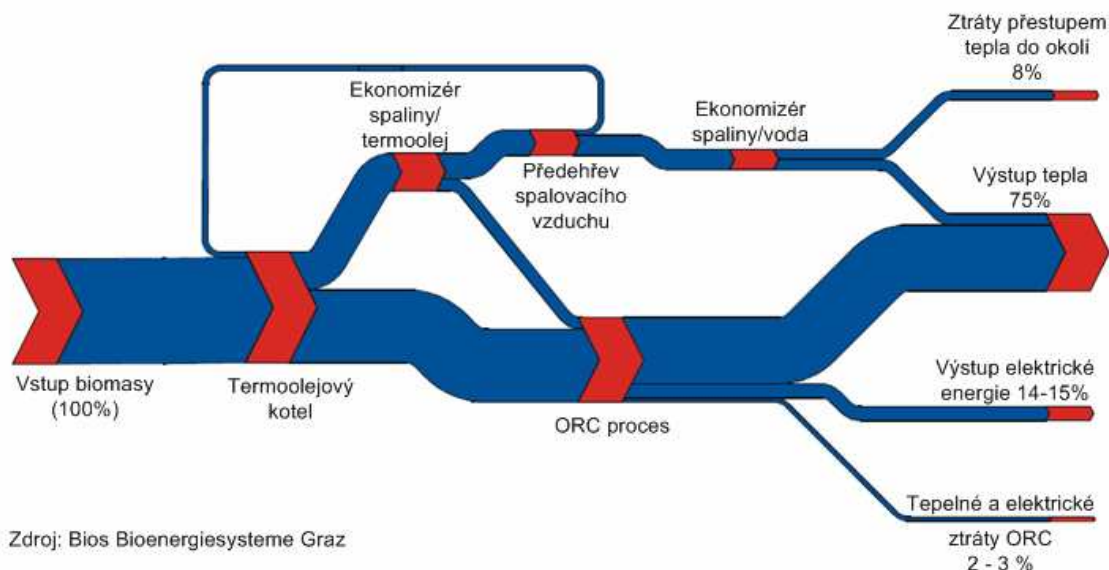
Obrázek 1.2 Příklad T-s diagramu s vyznačením vlivu zapojení ekonomizéru

Mezi jednotlivými body vyznačenými v grafu na obrázku (1.2) dochází k následujícím dějům: ohřev pracovního média (1-2), vypařování (2-3), přehřívání (3-4), expanze (4-5), kondenzace předáváním tepla (5-1). Oblast v grafu zvýrazněná oranžovou barvou označuje množství tepla, které do systému dodává ekonomizér, čímž dochází ke zvyšování účinnosti technologie.

V závislosti na typu technologie a použitém pracovním médiu v některých případech nedochází k přehřívání pracovního média (v diagramu znázorněno částí mezi body 3 a 4).

### 1.1.2 Tok energie

Výše uvedený princip technologie ORC a spalování biomasy je možné charakterizovat také schematickým znázorněním toku energie přiváděné do kotle v palivu (viz obrázek 1.3).



**Obrázek 1.3 Ukázka energetického toku technologií výroby tepla a elektrické energie [1]**

Procenta uváděná ve schematickém znázornění toku energie jsou udávána pro optimální stav provozu technologie využívající všech způsobů získávání energie z paliva uvedených v kapitole 1.3.2 (ekonomizéry). Za vstupní je považována energie obsažená v přiváděném palivu, vztažená k výhřevnosti tohoto paliva.

### 1.1.3 Důvody využití vloženého okruhu

Zamyslíme-li se nad funkcí ORC technologie, naskytá se otázka, jaké výhody vlastně má okruh, který je navíc vložený oproti klasické tepelné elektrárně, a proč nedochází, podobně jako u tepelné elektrárny s vodou, k ohřevu a výparu média, nesoucího energii ke generátoru, přímo v kotli na biomasu.

Výhoda, resp. nutnost ohřívat pracovní látku ORC přes vložený okruh termooleje je dána především jeho termodynamickými vlastnostmi. Teplota kritického bodu ORC média by byla při přímém ohřívání v kotli překročena a to hned několikanásobně, jelikož teploty v kotli při spalování biomasy překračují 1000 °C. Jelikož se jedná o látku chemicky vytvořenou, docházelo by tímto ke znehodnocování jejích vlastností.

Další podstatnou výhodou je, že okruh termooleje funguje i jako tlumič při výkonových změnách ve spalovacím zařízení (topeništi) a z toho plynou vyrovnanější změny v okruhu ORC, resp. rovnoměrnější chod turbíny. Dalším neméně podstatným



důvodem, proč neohřívat směs organických látek přímo ve spalovací komoře je ten, že se jedná o hořlavinu I.třídy.

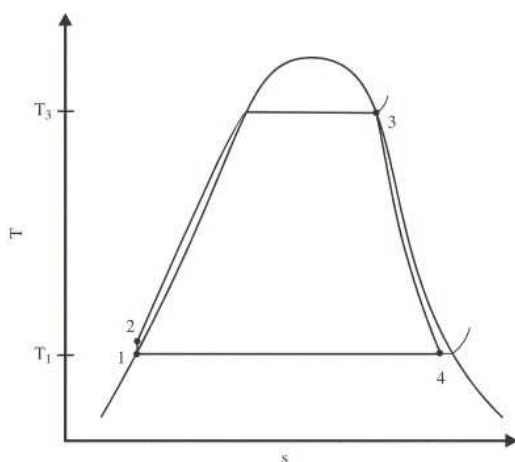
Termoolejový okruh je provozován za atmosférického nebo pouze mírně zvýšeného tlaku, což přináší značné výhody při konstrukci případně údržbě tohoto okruhu.

#### 1.1.4 Pracovní médium ORC [2]

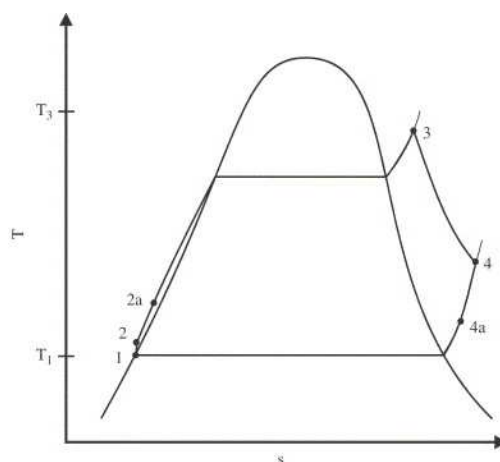
Jako pracovní médium ORC okruhu jsou využívány organické látky, které jsou v porovnání s vodou charakteristické svou vyšší molární hmotností, komplexnější molekulovou stavbou a i při využití jednodušší, jednostupňové turbíny, umožňují dosažení vyšší účinnosti. Tato média mají tu vlastnost, že se odpařují při nižších teplotách a tlacích, než v klasickém Rankin-Clausiově cyklu využívaná voda.

Důležitou vlastností pro klasifikaci ORC cyklů je tvar dolní a horní mezní křivky v tzv. T-s diagramu. Tento diagram o souřadnicích teplota  $T$  – entropie  $s$  umožňuje zobrazovat množství tepla přeneseného mezi okolím a systémem pro určitý průběh děje mezi výchozím a konečným stavem [3].

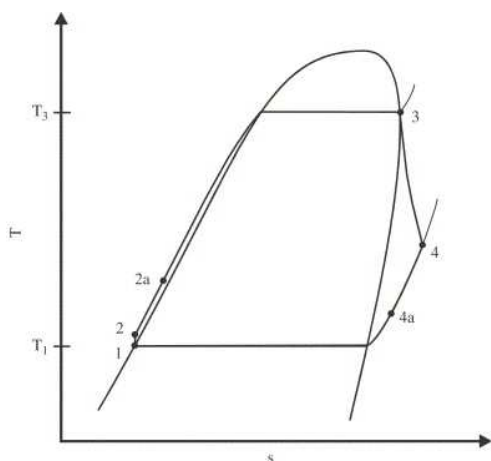
Dle tvaru T-s diagramu se pracovní látky, které by bylo možné využít v pracovním okruhu ORC, rozdělují do skupin. Na obrázcích 1.4 a 1.5 jsou ukázky T – s diagramů ORC cyklů pro média tvaru „zvonu“, na obrázku 1.6 je ukázka T - s diagramu ORC cyklu pro médium s „převislou křivkou“ (*ang. overhanging curve*). Dalším hlediskem pro rozdělení ORC cyklů je například tlak, za kterého pracovní médium odebírá teplo ze zdroje tepla (termooleje). ORC cykly se tímto způsobem dělí na cykly s tlakem podkritickým (obrázky 1.4, 1.5 a 1.6) a nadkritickým (obrázek 1.7).



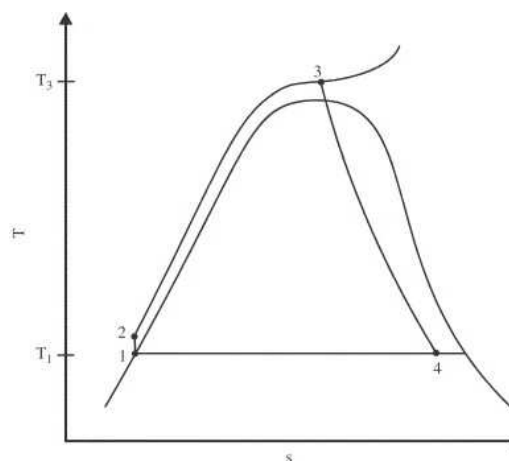
**Obrázek 1.4** ORC cyklus v T-s diagramu pro médium s diagramem tvaru zvonu a se vstupem nasycené páry do turbíny



**Obrázek 1.5** ORC cyklus v T-s diagramu pro médium s diagramem tvaru zvonu a se vstupem přehřáté páry do turbíny



**Obrázek 1.6** ORC cyklus v T-s diagramu pro médium s diagramem s převislou křivkou a se vstupem nasycené páry do turbíny













**Obrázek 1.7** T-s diagram pro ORC okruh s nadkritickým tlakem

Význam základních důležitých bodů v T-s diagramech je uveden v kapitole 1.1.1.

## 1.2 Výhody a nevýhody ORC

Hlavní výhody a nevýhody využívání ORC technologie je pro přehlednost vhodné uvést v přehledným, heslovitým způsobem.

### 1.2.1 Hlavní výhody ORC [4]

-  relativně vysoká účinnost i při nízkých teplotních spádech
-  nízké otáčky turbíny umožňující přímý pohon generátoru bez reduktoru
-  nízké mechanické namáhání turbíny v důsledku nízké obvodové rychlosti
-  zanedbatelná eroze lopatek turbíny vlivem absence kapiček pracovní látky
-  velký regulační rozsah
-  vysoká životnost zařízení díky relativně nízkým parametrům pracovního média (teplota pod 300°C, tlak kolem 1MPa na přetlakové straně)
-  nenáročnost na obsluhu
-  možnost využití energie ze zdrojů s relativně nízkou teplotou
-  odpadá nutnost doplňování a úpravy vody (úniky a doplňování organické pracovní látky v sekundárním okruhu jsou minimální)
-  nižší provozní náklady.

### 1.2.2 Hlavní nevýhody ORC

Mezi hlavní nevýhody ORC jednoznačně patří vysoká pořizovací cena této technologie. Například zařízení umístěná v Trhových Svinech a Třebíči mají náklady na jeden MW vyrobené energie značně vyšší, než je tomu u často diskutované jaderné elektrárny Temelín. Jejich realizace tak byla možná jen za pomoci výrazných státních dotací.

Termoolej v primárním okruhu je chemická látka, jejíž případný únik by mohl způsobit značné ekologické škody (k takovému havárii již v České republice dokonce skutečně došlo). Jako nevýhodu oproti „klasickému“ elektrárenskému cyklu, kde je pracovní médium voda, můžeme tedy jednoznačně považovat nutnost využití této chemické látky.

## 1.3 Kogenerace

Pro maximální využití energie dodávané do systému je technologie ORC využívána výhradně ve spojení s kogenerací, tedy současnou výrobou elektrické energie a tepla. V praxi tak dochází k tomu, že při zvýšené poptávce po teple je generátor, resp. celý sekundární okruh, vyřazen z provozu a dochází k přenosu tepla z termooleje přímo do okruhu s topnou vodou (takovýto režim provozu bývá označován jako teplárenský).

V případě poklesu odběru tepla se opět zapojí sekundární okruh a začne se vyrábět elektrická energie. Dochází tak k maximálnímu využití celé technologie.

V případě, že není zajištěn dostatečný odběr tepla po celý rok (např. v letních měsících, kdy v obytných domech není třeba vytápět), je zapotřebí dochlazovat vodu, vracející se z topného systému, za pomoci chladicích věží. Takovéto maření energie však značně zvyšuje cenu využití elektrické a tepelné energie. Nutnost častého zařazení dochlazovacího okruhu jednoznačně ukazuje na nevhodný výběr lokality, kde byla ORC technologie umístěna. Teplo vznikající při výrobě elektrické energie by mělo být kromě vytápění obytných domů dále využíváno například k ohřevu vody bazénů, v sušárnách dřeva a všude tam, kde je možné jeho využití celoročně.

## 2 ORC v České republice

V současné době je princip ORC využíván v České republice na dvou místech. Jsou to spalovny na biomasu v Třebíči a Trhových Svinech. Dle dostupných informací se v několika případech uvažuje o dalším zavedení této technologie na území České republiky. Finanční náročnost takovýchto projektů však dosud nedovolila podobné plány uskutečnit.

### 2.1 Teplárna Sever ve městě Třebíč

#### 2.1.1 Základní údaje

K prvnímu slavnostnímu spuštění jednotky ORC v naší republice došlo ve městě Třebíč. Zde se společnost TTS s. r. o. rozhodla v roce 2003 zakoupit tehdejší zadluženou firmu Nuclea a díky mimořádné finanční podpoře Státního fondu životního prostředí se pustila do modernizace zdejší teplárny. Vedení firmy zvolilo právě kombinovanou výrobu elektrické energie a tepla za pomoci technologie ORC. Realizace celého projektu si vyžádala investici ve výši 194 milionů [5].

Na tomto systému ORC je mimo německé turbíny a generátoru uplatněna výlučně česká technologie, dodávaná právě firmou TTS s. r. o. Používané topeniště je vyrobeno a dodáno firmou Nuclea.

#### Jednotlivé komponenty dodané a kompletované firmou TTS EKO s. r. o.:

- Kotel na biomasu VESKO-B 3,0 MW
- Termoolejový kotel 7,0 MW
- Zařízení ORC 1100 kWe

#### 2.1.2 Technické údaje o technologii instalované v Třebíči

Základní výkonové parametry ORC instalovaného v Třebíči jsou uvedeny v tabulce 2.1. Teplota termooleje vstupujícího do ORC okruhu se pohybuje kolem 300 °C.

**Tabulka 2.1 Výkonové parametry technologie umístěné ve městě Třebíč [5]**

Výkonové parametry	
Výkon spalovací komory (ohniště)	6,6 MW
Výkon tepelný	5,38 MW
Výkon elektrický	1 MW
Tepelná účinnost ORC zařízení při jmenovitém výkonu	80,5 %
Elektrická účinnost ORC zařízení při jmenovitém výkonu	17 %
Dodávka elektrické energie z biomasy za rok	5500 MWh

### 2.1.3 Provedení

Termoolejový kotel na spalování biomasy je zapojen tak, aby umožňoval jak klasickou kogeneraci (tedy výrobu tepla a elektrické energie zároveň), tak pouze i výrobu tepelné energie. Při teplárenském provozu je veškeré teplo z termoolejového okruhu vedeno přes paralelní výměník olej/voda a přes vložený okruh voda/voda do systému centrálního zásobování teplem.

#### Bezpečnost

Termoolejový okruh, který je přímo v kontaktu s topeništěm, je samozřejmě nutné co nejlépe zabezpečit proti havárii. Při normálnímu provozu jsou horké spaliny vedeny přes hlavní olejový výměník tepla dále přes olejový a vodní ekonomizér.

V případě havárie okruhu termooleje jsou spaliny z topeniště vedeny okolo termoolejového výměníku přes vodní ekonomizér, čímž se daří vyhnout se přímému kontaktu horkých spalin (cca 900 °C) a termooleje.

Dalším zabezpečením je přítomnost havarijního chlazení oleje, které je tvořeno nádrží s vodní náplní a čerpadlem havarijního chlazení oleje.

#### Zajištění plynulého chodu

K zajištění vyrovnaní denní spotřeby tepla a zároveň maximálního využití ORC je do systému topné vody zapojen beztlaký akumulátor tepla. Jeho objem je 1800 m<sup>3</sup>.

Díky tomuto zařízení se výrazně snižuje nutnost chlazení přebytkového tepla vznikajícího při výrobě elektrické energie.

## 2.2 Teplárna na biomasu v Trhových Svinech



Obrázek 2.1 Příprava ORC modulu v Trhových Svinech (zdroj Schiestl, spol. s r. o.) [6]

### 2.2.1 Základní údaje [5]

V dubnu roku 2004 byla v Trhových Svinech zahájena instalace kotle na spalování biomasy, který při společné výrobě tepla a elektrické energie využívá výhod systému ORC. Nainstalovaný termoolejový kotel na spalování biomasy má tepelný výkon 3,5 MW a elektrický výkon ORC jednotky je 0,6 MW (ORC Turboden typ 300/250 x 90/70 °C 0,600 MW). Výrobce kotle je rakouská firma Kohlbach, pro výrobu elektrické energie bylo vybráno italské zařízení Turboden. Zástupcem obou těchto firem pro Českou republiku je firma Schiestl.

### 2.2.2 Technické údaje technologie instalované v Trhových Svinech

Výkonové parametry technologie instalované v Trhových Svinech jsou uvedeny v tabulce 2.2.

**Tabulka 2.2 Výkonové parametry technologie umístěné ve městě Trhové Sviny [5]**

Výkonové parametry	
Výkon spalovací komory (ohniště)	3,5 MW
Výkon tepelný	2,8 MW
Výkon elektrický	0,6 MW
Tepelná účinnost ORC zařízení při jmenovitém výkonu	80 %
Elektrická účinnost ORC zařízení při jmenovitém výkonu	17,1 %
Dodávka elektrické energie z biomasy za rok	4200 MWh

### 2.2.3 Provedení

Dávkování paliva ze skladu paliva do termoolejového kotle je zabezpečeno přesuvným hydraulickým dopravníkem, rošt kotle je šikmý, posuvný. Do kotle je pomocí spalinových ventilátorů přiváděn spalovací vzduch předehřátý zbytkovým teplem odcházejících spalín.

Spaliny z kotle proudí přes olejový výměník, ekonomizéry oleje a vody a předehříváče spalovacího vzduchu do odlučovače tuhých částic (multicyklonu) a následně do komínu. Před vstupem do komínu mají teplotu cca 200 °C.

Celý systém je možné provozovat buď klasicky s využitím ORC jednotky na výrobu elektrické energie nebo v takzvaném teplárenském režimu provozu (jednotka ORC je mimo provoz), kdy je ohřev topné vody zajišťován pomocí výměníku termoolej/voda a přes výměník spaliny/voda (vodní ekonomizér).



## 3 ORC technologie ve městě Schöneck

### 3.1 Základní údaje

ORC v německém městě Schöneck je první zařízení tohoto typu, které bylo instalováno na území Saska. Financování projektu proběhlo za přispění Evropské unie. Celkově bylo investováno 3,8 mil. EUR. Předpokládaná roční spotřeba biomasy je 10 000 tun, čemuž odpovídá produkce popela 400 tun [7].

Zařízení je v provozu od první poloviny roku 2006. Dodavatelem primárního, termoolejového okruhu je firma Maxxtec AG [8], sekundární okruh, resp. celé ORC zařízení, bylo dodáno firmou Adoratec GmbH [9], kotel na spalování biomasy je od firmy Mawera (obrázek 3.1). Základní výkonové parametry technologie v Schönecku tak, jak je uvádí dodavatelé, jsou uvedeny v tabulce 3.1.

**Tabulka 3.1 Výkonové parametry technologie umístěné v německém městě Schöneck [7]**

Výkonové parametry	
Výkon spalovací komory (ohniště)	3,7 MW
Výkon tepelný	2,7 MW
Výkon elektrický	0,56 MW
Dodávka elektrické energie z biomasy za rok	4270 MWh

### 3.2 Charakteristické znaky technologie

V kapitole 1 této práce je popsán obecný princip použití technologie ORC ve spojení s kotlem na spalování biomasy. Technologie aplikovaná ve městě Schöneck v principu odpovídá tomuto popisu, avšak je možné u ní najít několik specifíků.

### 3.2.1 Přikládání paliva do kotle

Palivo do kotle na biomasu není přikládáno kontinuálně, ale v určitých časových intervalech (při běžném provozu jsou tyto intervaly cca 10 minut). Mezi jednotlivými příkládkami dochází za pomoci pásového dopravníku k přísunu dřevní štěpky do lisovací komory. V této komoře je palivo lisováno a je měřena jeho vlhkost. Následně dojde v danou dobu k otevření kotle a vložení štěpky, takto upravené do tvaru kváдру, do topeniště.



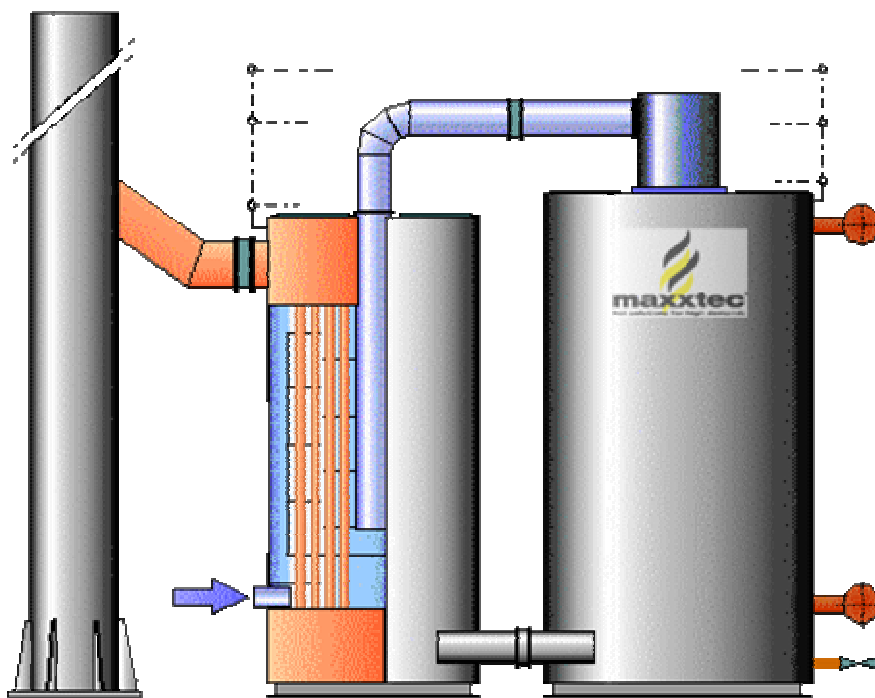
Obrázek 3.1 Instalace kotle na biomasu s ekonomizéry - Schöneck [10]

### 3.2.2 Ekonomizéry

Část tepla obsaženého ve spalínách vycházejících z kotle, je dále využíváno za pomoci dvojice ekonomizérů – výměníků spaliny/termoolej. Na schématu z obrázku 3.3 jsou tyto ekonomizéry označeny čísly I.1 a I.2. Část tepla ze spalín je v nich předána do termooleje v primárním okruhu, čímž se zvyšuje účinnost technologie.

Dalším způsobem zvyšování účinnosti systému je předehřívání spalovacího vzduchu vstupujícího do topeniště. K tomuto slouží výměník termoolej/vzduch, který je ve schématu na obrázku 3.3 označen číslem I.4.

K předehřevu spalovacího vzduchu bývá často využíváno také zbytkového tepla obsaženého ve spalinách, které by jinak bylo vypuštěno komínem. Na internetových stránkách dodavatele primárního okruhu, firmy Maxxtec AG [8], je o takovémto využití zbytkového tepla pojednáváno (viz příklad na obrázku 3.2). Dalo by se předpokládat, že tento ekonomizér byl do technologie zapojen tak, jak je firmou Maxxtec nabízeno. V technických výkresech dodaných zadavatelem zakázky však k tomuto způsobu využití tepla spalin nejsou uvedeny žádné údaje, a proto s ním při dalších výpočtech není uvažováno. Je možné předpokládat, že vliv tohoto ekonomizéru na celkovou účinnost by v případě jeho použití, resp. započítání, nebyl vysoký.



Obrázek 3.2 Příklad využití zbytkového tepla spalin k předehřevu spalného vzduchu ekonomizérem spaliny/vzduch [12]

### 3.2.3 Okruh nouzového chlazení

Za účelem zamezit přehřátí termoolejového okruhu např. při odstavení generátoru v ORC okruhu nebo při případných nestandardních situacích, je možné v primárním okruhu využít nouzový výměník termoolej/chladičí kapalina. Při běžném provozu je čerpadlo zajišťující průtok tímto výměníkem vypnuto.

### 3.2.4 Teplárenský režim

V případě potřeby zajištění vysokého tepelného výkonu technologie je možné zastavit výrobu elektrické energie a maximum tepelného výkonu kotle využívat na pokrytí poptávky spotřebitelů tepla. K zajištění tohoto požadavku je v primárním okruhu připraven výměník termoolej/voda, jehož zapojením je tepelná energie předávána z termooleje přímo do topné vody. Sekundární okruh, resp. celé ORC zařízení, není v danou chvíli využíváno. Zmiňovaný výměník termoolej/voda je ve schématu na obrázku 3.3 označen číslem I.6.

V případě běžného režimu provozu, kdy je zapojen ORC okruh a vyráběna elektrická energie, je na základě aktuálního tepelného výkonu kotle a poptávky po tepelné energii tento výměník možno zapojovat paralelně s okruhem ORC, čímž dojde k tomu, že část tepla z kotle je předávána do okruhu ORC na výrobu elektřiny a část je využita přímo k ohřívání topné vody.

Výměník termoolej/voda je kromě teplárenského provozu používán také při náběhu technologie.

## 3.3 Technické výkresy a zjednodušená schémata

### 3.3.1 Podklady od zadavatele zakázky

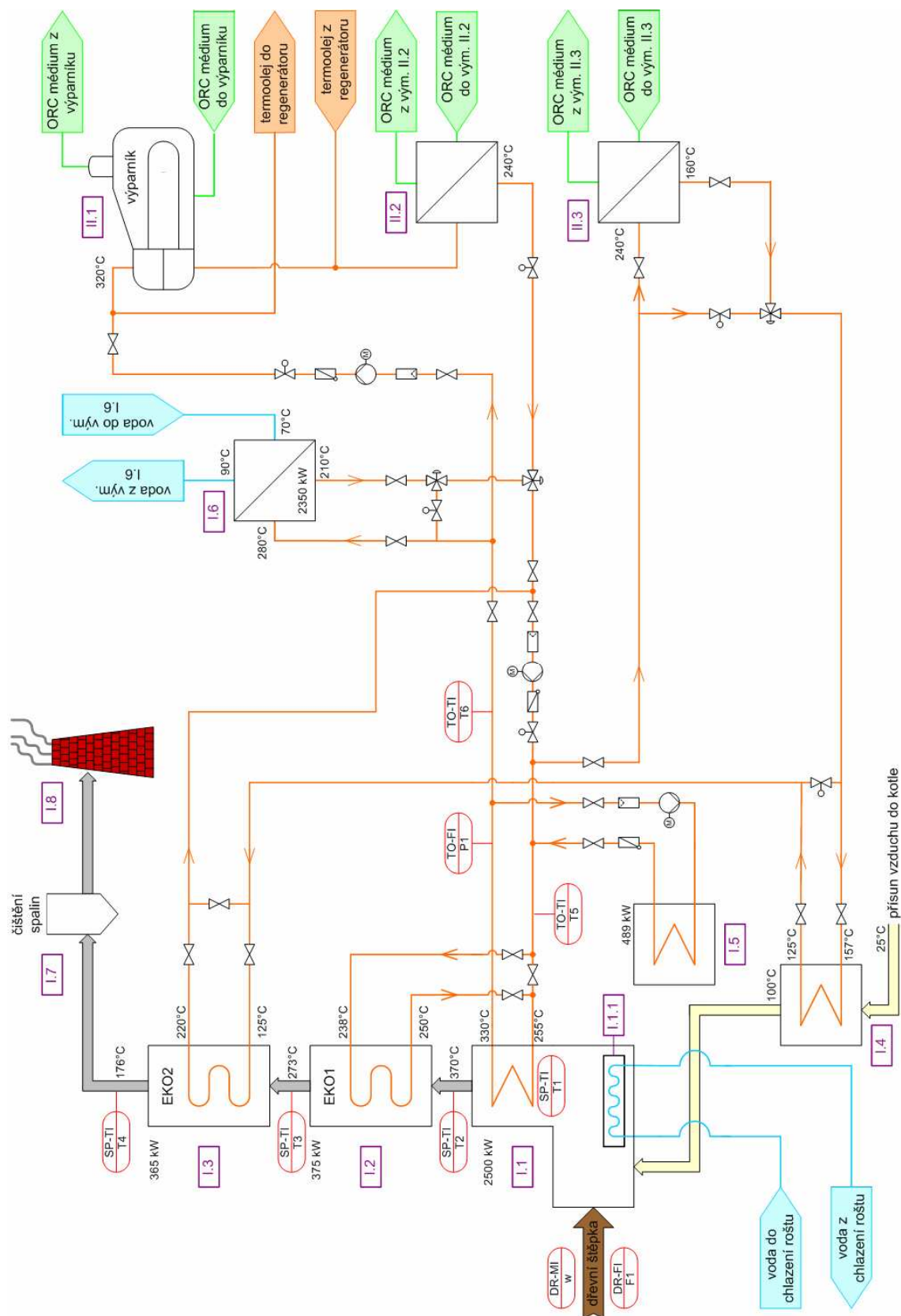
Zadavatel zakázky dal pro výpočet účinnosti k dispozici technické výkresy technologie, soubor se základním popisem některých měřených veličin a dále umožnil online přístup k datovým souborům s hodnotami naměřenými za určité období. Část datových souborů, které byly poskytnuty k dispozici, je uvedena na příloženém CD. Technologické výkresy z důvodu uchování know-how dodavatelských firem nebylo možné k této práci přiložit.

Zjednodušená schémata uvedená v této práci (obrázky 3.3 až 3.5 a 4.2) jsou sestavena podle výkresů a pro účel stanovení způsobu výpočtu účinností jsou dostačující. Schémata byla sestavena na základě výkresů 01-V-01-5-103 Rev. E, 01-V-01-5-01 Rev. E a 01-V-01-5-304 Rev. E.

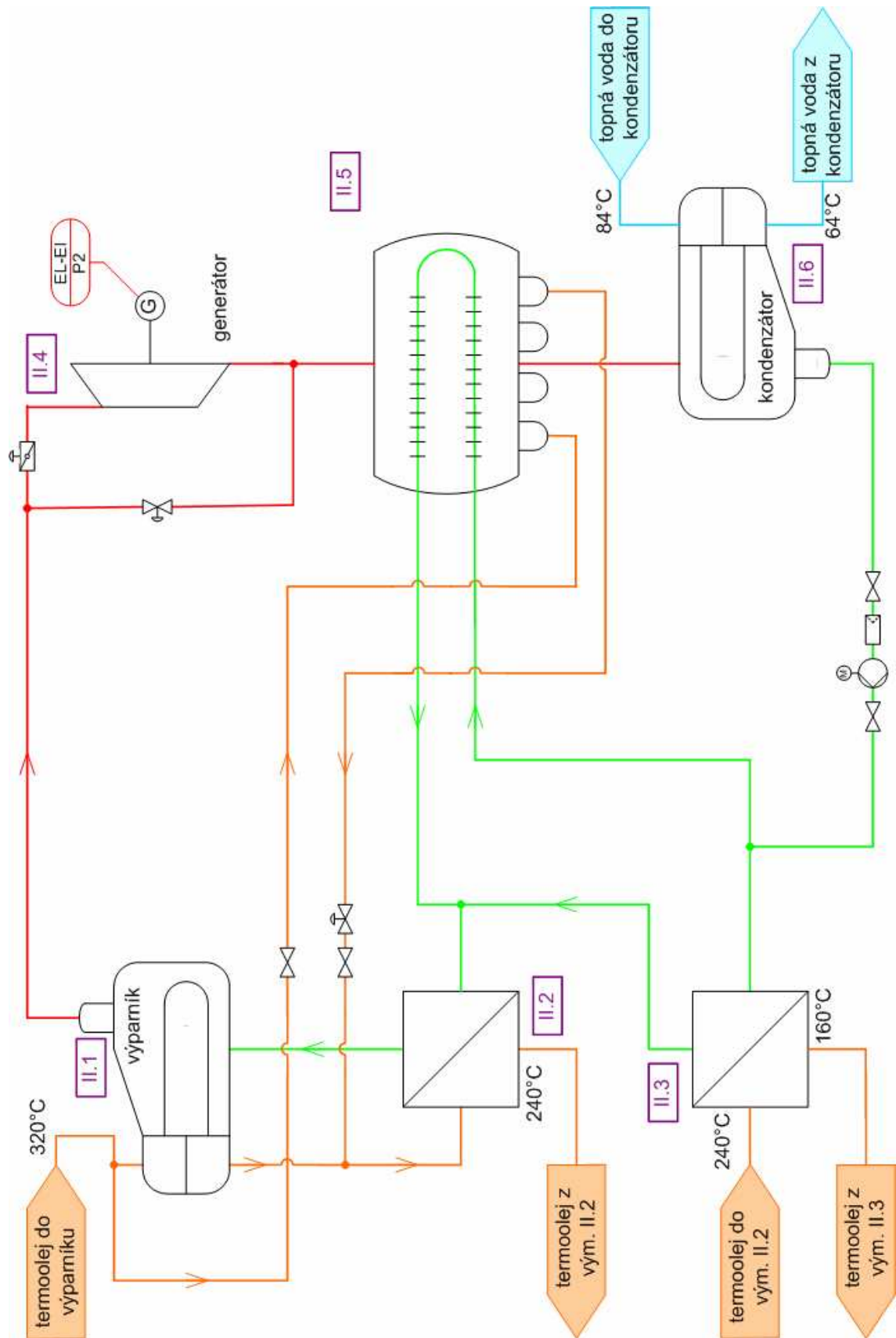
### 3.3.2 Zjednodušená schémata technologie

Podle technických výkresů byla vytvořena zjednodušená schémata technologie, která zachycují základní princip fungování technologie a zároveň jsou na nich vyznačena měřicí místa, z nichž zadavatel zakázky poskytuje naměřené údaje, a jsou pro výpočet některé z účinností užitečná. Do těchto schémat nebyly zakresleny například změny průřezu potrubí apod.

Schéma na obrázku 3.3 zachycuje primární okruh s termoolejem. Obrázek 3.4 podává informaci o funkci sekundárního okruhu, tedy samotného ORC zařízení. Na obrázku 3.5 je možné vidět zjednodušené schéma okruhu s topnou vodou. Jednotlivá schémata na sebe navazují tak, jak je v obrázcích naznačeno.

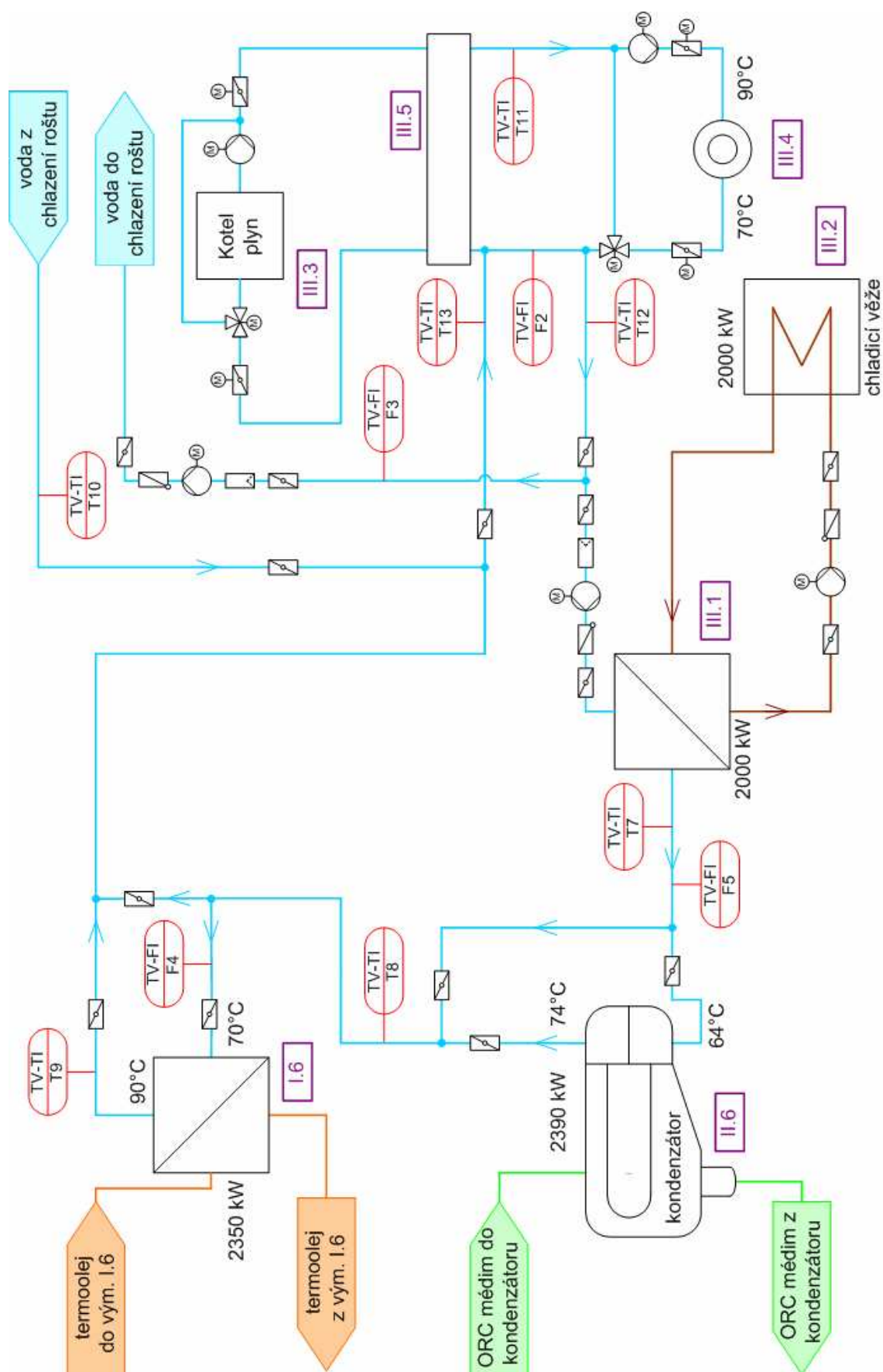


Obrázek 3.3 Zjednodušené schéma termoolejového okruhu



Obrázek 3.4 Zjednodušené schéma sekundárního okruhu – ORC





Obrázek 3.5 Zjednodušené schéma vodního okruhu



**Vysvětlivky ke schémátům z obrázků 3.3 – 3.5**

Fialovými čísly v rámečku jsou ve schématech označovány základní prvky celé technologie. Na obrázku 3.3, který znázorňuje primární, termoolejový okruh, jsou to následující:

- I.1.1 Rošt kotle chlazený vodou
- I.1 Termoolejový kotel na biomasu
- I.2, I.3 Ekonomizéry využívající teplo ze spalin k ohřevu termooleje
- I.4 Přehřívač spalovacího vzduchu
- I.5 Nouzový výměník termoolej/chladicí kapalina
- I.6 Výměník termoolej/topná voda využívaný při náběhu technologie nebo při teplotěnském provozu
- II.1 Výparník
- II.2, II.3 Výměníky termoolej/ORC médium







Schéma na obrázku 3.5 obsahuje další zařízení:

- II.4 Generátor
- II.5 Regenerátor
- II.6 Kondenzátor
- III.1 Výměník termoolej/chladivo pro dochlazování vody vracející se z topného systému
- III.2 Chladicí věže
- III.3 Plynové kotle na ohřev vody
- III.4 Systém centrálního zásobování teplou vodou – spotřebiče tepla
- III.5 Termohydraulický rozdělovač

Schéma na obrázku 3.4 obsahuje zařízení, která již byla popsána pro obrázky 3.3 a 3.5 a označení těchto prvků ve schématu odpovídá značení v uvedených schématech.

Jednotlivé druhy médií jsou ve schématech odlišeny barvami potrubí dle tabulky 3.2. Konkrétní hodnoty teplot, které jsou ve schématech (obrázky 3.3 – 3.5) naznačeny, jsou teploty projektované.

Tabulka 3.2 Označení druhů médií ve schématech na obrázcích 3.3 - 3.5

Značení potrubí ve schématech	Význam
	Vedení termooleje s označením směru toku potrubím
	Vedení ORC média s označením směru toku potrubím
	Vedení páry s označením směru toku potrubím
	Vedení topné vody s označením směru toku potrubím
	Vedení spalín s označením směru proudění potrubím
	Vedení spalovacího vzduchu do kotle s označením směru proudění potrubím

Značky jednotlivých zařízení uvedené ve schématech byly přizpůsobeny českému prostředí dle dokumentu „Značky pro kreslení dokumentace ve vytápění“ uvedeného v příloze A této práce.

Jednotlivá čidla jsou ve schématech označena písmenem a číslem, přičemž písmeno vyjadřuje měřenou veličinu (F - průtok, T – teplota, P - výkon). Pro přehlednost je toto označení, které je dále používáno i ve všech dalších výpočtech při určování účinnosti apod., uvedeno v tabulce 3.3.

Hlavní čerpací stanice pro jednotlivé okruhy pracovních médií jsou zdvojené z důvodu zajištění stálého průtoku v případě poruchy nebo potřeby provedení údržby jednoho z čerpadel.

Tabulka 3.3 Označení čidel ve schématech, výpočtech, technických výkresech, umístění ve zdroji dat

Veličina [jednotky]		Značení ve výkresu	Značení ve schématech a výpočtech	Význam veličiny	Sloupec datového souboru
Palivo	Vlhkost [%]	-	w	Vlhkost dřevní štěpky vstupující do kotle	J / 10
	Objemový průtok [m <sup>3</sup> /h]	-	F1	Objemový průtok dřevní štěpky do kotle	I / 9
Spaliny	Teplota [°C]	-	T1	Teplota nad topeništěm	AG / 33
		RG-TIR 102	T2	Teplota spalin před ekonomizérem 1	V / 22
		RG-TIR 103	T3	Teplota spalin mezi ekonomizéry 1 a 2	W / 23
		RG-TIR 104	T4	Teplota spalin za ekonomizérem 2	X / 24
Termoolej	Tepelný výkon [kW]	TO-FIR 101	P1	Teplo dodávané do systému kotlem a eko1	G / 7
	Teplota [°C]	TO-TIR 101	T5	Teplota termooleje před kotlem a ekonomizérem 1	Z / 26
		TO-TIR 106	T6	Teplota termooleje za kotlem na biomasu	Y / 25
Voda	Objemový průtok [m <sup>3</sup> /h]	HW-FT 110	F2	Část průtoku vody z topného systému	B / 2
		HW-FT 102	F3	Průtok vody do chlazení roštu kotle na biomasu	D / 4
		HW-FT 103	F4	Průtok vody do výměníku termoolej/voda	C / 3
		HW-FT 101	F5	Průtok vody výměníkem voda/glykol	E / 5
	Teplota [°C]	HW-TT 105	T7	Teplota vody za výměníkem voda/glykol	M / 13
		HW-TT 108	T8	Teplota vody mezi kondenzátorem a výměníkem termoolej/voda	T / 20
		HW-TT 109	T9	Teplota vody za výměníkem termoolej/voda	U / 21
		HW-TT 113	T10	Teplota vody vystupující z chlazení roštu kotle	O / 15
		-	T11	Teplota vody do topného systému před směřováním	K / 11
		-	T12	Teplota vody vracující se z topného systému	L / 12
		-	T13	Teplota vody před termohydr. rozdělovačem	Q / 17
	Elektrický výkon [kW]	EL-EL 105	P2	Elektrický výkon generátoru	AE / 31

## 4 Analýza a výpočet účinnosti technologických celků

Provoz tepelných zařízení je vždy spojen s jistými ztrátami. V praxi to znamená, že část energie, která je do systému dodávána, se nepodaří užitečně zpracovat. Cílem při konstrukci a provozu tepelných zařízení je minimalizovat množství nevyužitě energie. Skutečnost, jak velká část dodávané energie je v tepelném zařízení přeměněna na užitečnou, popisuje fyzikální veličina nazývaná účinnost, která se značí řeckým písmenem  $\eta$ .

Tepelná účinnost je definována jako poměr užitečného tepla ( $Q_{UŽ}$ ) získaného z tepla přivedeného do systému ku celkovému teplu do systému přivedenému ( $Q_{IN}$ ). Platí tedy vztah:

$$\eta = \frac{Q_{UŽ}}{Q_{IN}} [ ] \quad (4.1)$$

Teplo  $Q$  je formou energie, přenášenou tepelným působením mezi systémem a okolím, není tedy stavovou veličinou. Jeho přenos je vyvolán teplotním spádem.

Množství tepla pro nekonečně malou změnu teploty systému je možné určit na základě vzorce (4.2), kde  $m$  vyjadřuje fyzikální veličinu hmotnost,  $c$  měrnou tepelnou kapacitu a  $T$  teplotu.

$$dQ = m * c * dT [J] \quad (4.2)$$

Za pomoci vzorce (4.2) je možné mimo jiné stanovit množství tepla odebraného z pracovní látky za určenou dobu při jejím průchodu výměníkem, což je důležitý údaj pro následné stanovení účinnosti měřeného technologického celku.

Teplo, které bylo za určité časové období odebráno z pracovní látky při jejím průtoku výměníkem, je možné dle vzorce (4.2) určit na základě hmotnosti pracovní látky  $m$ , která výměníkem za danou dobu protekla, její měrné tepelné kapacity  $c$  a rozdílu teplot pracovní látky na vstupu a výstupu výměníku  $\Delta T$ . Vzhledem k tomu, že v praxi bývá nejčastěji měřen objemový průtok  $\dot{V}$  pracovní látky výměníkem, je pro výpočet tepla odevzdaného ve výměníku nutné znát také hustotu pracovní látky  $\rho$  a dobu  $\tau$ , za kterou chceme množství tepla měřit. Vzorec (4.2) je poté možné upravit do následující podoby:

$$Q = c * \rho * \dot{V} * \tau * \Delta T [J] \quad (4.3)$$

Při vyšetřování tepla předávaného ve výměnících se v praxi pro usnadnění zavádějí některá zjednodušení. Je uvažována konstantní tepelná kapacita i hustota pracovní látky pro každé místo jejího průchodu výměníkem a jsou zanedbávány tepelné ztráty z povrchu výměníku do jeho okolí. Tato omezení však v praxi nevedou k významnějším nepřesnostem [11].

Jelikož je při určování účinnosti tepelného zařízení za určité období jak přivedené, tak i odvedené (užitečné) teplo počítáno vztažené právě k tomuto časovému období, je možné tepla ve vzorci (4.1) pro výpočet účinnosti nahradit průměrnou hodnotou vstupního ( $\dot{Q}_{IN}$ ) a výstupního ( $\dot{Q}_{OUT}$ ) tepelného výkonu za dané období. Pro tepelnou účinnost zařízení, resp. technologického celku, poté platí vztah

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{OUT}}{\dot{Q}_{IN}} [ ] \quad (4.4)$$

kde jednotlivé průměry tepelných výkonů pro dané období lze určit ze vztahu (4.5).

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{d\tau} = c * \dot{m} * \Delta T = c * \rho * \dot{V} * \Delta T [J / s] \quad (4.5)$$

Průtok  $\dot{V}$  i tepelný výkon  $\dot{Q}$  je v tomto případě vždy průměrná hodnota za dané období.

Aby bylo možné pro jednotlivé veličiny používat shodné označení jak v textu této práce, tak i v kódu přiloženého programu pro výpočet účinnosti, je dále tepelný výkon  $\dot{Q}$  označován jako  $P_Q$  a objemový průtok  $\dot{V}$  písmenem  $F$ .

### Tepelná účinnost kotle

Tepelná účinnost kotle je definována jako poměr tepla užitečně uvolněného z paliva do pracovní látky ku teplu v palivu přivedeném. Platí tedy vztah:

$$\eta = \frac{Q_{UŽ}}{Q_{PAL}} \quad (4.6)$$

kde  $Q_{UŽ}$  je užitečné teplo v pracovní látce a  $Q_{PAL}$  je teplo přivedené v palivu.

Množství tepla přivedeného do systému v palivu  $Q_{PAL}$  je ve spojení s účinností běžně vztahováno k tzv. výhřevnosti paliva  $q_v$ . Výhřevnost však nezahrnuje celé chemicky vázané teplo v palivu, ale pouze jeho část. Celé teplo chemicky vázané v palivu se označuje jako teplo spalné  $q_{spal}$ . Odečteme-li od tohoto spalného tepla kondenzační teplo vlhkosti obsažené v palivu, získáme právě tzv. výhřevnost. Pro

přehlednost jsou definice pojmů spalné teplo, výhřevnost a kondenzační teplo uvedeny v tabulce 4.1.

**Tabulka 4.1 Definice pojmů výhřevnost, spalné teplo a kondenzační teplo [13]**

Veličina	Význam veličiny
Výhřevnost	Množství tepla v jednotkovém množství paliva, odpovídající spalnému teplu zmenšenému o kondenzační teplo vlhkosti ve spalínách.
Spalné teplo	Množství tepla, které se uvolní dokonalým spálením 1 kg či 1 m <sup>3</sup> paliva a ochlazením spalin na teplotu okolí, včetně využití kondenzačního tepla vodní páry ve spalínách.
Kondenzační teplo	Teplo potřebné k přeměně látky z fáze plynné na fázi kapalnou.





Udávaná účinnost tepelných zařízení (např. kotlů) je v praxi vztahována k výhřevnosti paliva a ne k jeho spalnému teplu. Z této skutečnosti je zřejmé, že běžně používaný způsob stanovení účinnosti tepelných zařízení je v některých případech v rozporu s podstatou termodynamických zákonů. Při zjišťování účinnosti například kondenzačních kotlů, kde dochází k využití části kondenzačního tepla spalin, je totiž teoreticky možné takovýmto výpočtem dosáhnout hodnoty účinnosti větší než jedna. Je nutné si uvědomit, že se u takového systému ve skutečnosti nejedná o Perpetum mobile, ale že vypočítaná hodnota účinnosti větší než jedna pouze poukazuje na nevhodný způsob jejího stanovování [14].

S vědomím uvedené skutečnosti je v této práci v případě výpočtů zahrnujících hodnotu tepla vstupujícího do systému ve formě paliva počítáno s teplem vztaženým k výhřevnosti. Důvodem tohoto výběru byla skutečnost, že takto získané hodnoty je možné porovnávat s v praxi u tepelných zařízení běžně uváděnými údaji.

### Stanovení technologických celků pro výpočet účinnosti

Jedním z cílů této práce je zvolit technologické celky, jejichž určované účinnosti budou mít vysokou vypovídající hodnotu o provozované technologii, a dále stanovit způsob výpočtu těchto účinností.

Bylo navrženo určování účinnosti následujících celků:

-  samostatný kotel na biomasu
-  kotel na biomasu s ekonomizéry
-  celá technologie
-  ORC zařízení jako celek dodaný externí firmou.

Z rozboru skupiny čidel umístěných v technologii, ze kterých její provozovatel poskytl data z měření v reálném provozu, však vyplynulo, že v rámci zakázky nebude ze čtyř výše uvedených účinností možné počítat účinnost samotného ORC zařízení, jelikož k tomuto výpočtu není k dispozici dostatek měřených veličin.

Pro přesnější určování účinnosti kotle na biomasu, kotle na biomasu s ekonomizéry a celé technologie by bylo vhodné umístění dalších čidel, která by měřila průtok a teplotu na určených místech. S přihlédnutím k ekonomické stránce věci je však zřejmé, že takovýto požadavek je obtížně splnitelný, a proto jsou potřebné údaje dopočítávány na základě naměřených hodnot, které jsou k dispozici. Výsledné účinnosti tímto způsobem nejsou počítány s takovou přesností, jako by tomu bylo v případě, že by bylo měřeno více hodnot, ale výsledky jsou i při využití tohoto způsobu vyhovující.

## 4.1 Účinnosti na základě měřených veličin

Na schématech z obrázků 3.3 - 3.5 jsou zakreslena měřicí místa, ze kterých jsou zadavatelem zakázky poskytována naměřená data. Základní popis jednotlivých měřicích míst je uveden v tabulce 3.3. Bližším popisem struktury datových souborů, naměřených dat a jejich úpravou se blíže zabývá kapitola 4.3.

Vzorce uvedené v celé této kapitole jsou uvedeny s přihlédnutím k tomu, v jaké formě jsou dodávány naměřené veličiny v datových souborech. Pokud je tedy například průtok  $F2$  v datovém souboru udáván v jednotkách  $m^3/h$  a ve vzorci pro výpočet tepelného výkonu je zapotřebí počítat s jeho hodnotou vztaženou na jednu sekundu, je poté pro tuto požadovanou hodnotu ve vzorci uveden přímo vztah  $F1/3600$ .

Přesnost, s jakou jsou výsledné hodnoty účinností počítány, je závislá na přesnosti čidel použitých pro měření jednotlivých hodnot. Obecný postup stanovení odchylky vypočítané hodnoty je uveden v kapitole 4.4 a je možné jej použít pro výpočty odchylek hodnot získaných za pomoci níže uvedených vzorců.

#### 4.1.1 Celková účinnost technologie

Celkovou účinností technologie  $\eta_{celk}$  je označována účinnost, která vyjadřuje efektivitu, s jakou je využívána energie chemicky vázaná v palivu dodávaném do systému, tedy jak velká část energie z paliva je převedena na užitečnou. Užitečnou energií je myšlena elektrická energie a teplo odebírané topným systémem. Pro stanovení energie v palivu vstupujícím do kotle je zapotřebí nejprve zjistit výhřevnost tohoto paliva.

##### Stanovení výhřevnosti paliva

Energie je do systému dodávána v dřevní štěpce. Způsob výpočtu energie dodané do systému v palivu určuje předpis 502/2005 Sb, který stanovuje vzorec pro výpočet výhřevnosti  $q_v$  tuhého paliva dodaného do systému (viz vzorec (4.9))

$$q_v = (q_{spal} - 0,218 * H) * \frac{100 - w}{100} - 0,02442 * w \quad [MJ / kg] \quad (4.9)$$

Význam značek použitých ve vzorci (4.9) je uveden v tabulce 4.2.



Tabulka 4.2 Význam značek použitých ve vzorci (4.9) pro výpočet výhřevnosti

Značka	Jednotky	Popis
$q_v$	[MJ/kg], [MJ/m <sup>3</sup> ]	Průměrná výhřevnost paliva v původním stavu, která se stanovuje výpočtem podle vzorce (4.9).
$q_{spal}$	[MJ/kg], [MJ/m <sup>3</sup> ]	Spalné teplo paliva v bezvodém stavu, které se stanovuje měřením v k tomu akreditované laboratoři na reprezentativních vzorcích paliva.
$H$	[%]	Obsah vodíku v palivu vztažený k hmotnosti paliva v bezvodém stavu – jako univerzální hodnotu je možné použít 5,5%, pokud tím není zkreslena skutečnost. Jinak je nutné obsah vodíku stanovit v k tomu akreditované laboratoři měřením provedeným podle přesně daného postupu na reprezentativních vzorcích paliva.
$w$	[%]	Celkový hmotnostní obsah vody v palivu v původním stavu, který se stanovuje měřením reprezentativních vzorků paliva.

Zadavatel zakázky si pro výpočet výhřevnosti paliva  $q_v$  přál použít vzorec (4.9) upravený na základě vlastních zkušeností s palivem, které je v technologii využíváno. Pro veškeré další výpočty výhřevnosti je proto výhřevnost paliva počítána vzorcem (4.8), jehož použití si zadavatel zakázky vyžádal. Případné upřesnění tohoto vzorce by bylo možné na základě výsledků laboratorního rozboru aktuálně využívaného paliva.

$$q_v = 18,8 * \frac{100 - w}{100} - 0,0244 * w \quad [MJ / kg] \quad (4.10)$$

Pro kontrolu je možné vzorec (4.10) (požadovaný zadavatelem zakázky) a vzorec (4.9) (daný českým předpisem 502/2005 Sb.), porovnat. Zadavatel kromě oříznutí jednoho desetinného místa u původní konstanty 0,02442 dále ve vzorci využívá konstantu vypočítanou z průměrných hodnot obsahu vodíku v palivu  $H$  a spalného tepla  $q_{spal}$  běžně používaného paliva (viz vzorec 4.11).

$$(q_{spal} - 0,218 * H) = 18,8 \quad [MJ / kg] \quad (4.11)$$

Předpokládáme-li, že hodnota obsahu vodíku v biopalivu se nejčastěji pohybuje okolo 5,5%, pak je možné lehce vyvodit závěr, že při použití vzorce (4.10) dodaného

zadavatelem zakázky je průměrná hodnota spalného tepla, se kterou je počítáno,  $q_{spal} \doteq 20 \text{ MJ/kg}$ . To je také hodnota, která by se u běžně dostupného paliva dala předpokládat a proto je možné vzorec (4.10) požadovaný zadavatelem pro výpočet označit za vyhovující. Základní charakteristika dřevní štěpky používané jako topivo je uvedena v tabulce 4.3.

**Tabulka 4.3 Základní charakteristika dřevní štěpky – nasekaný dřevní odpad z pilařských provozů [15]**

Charakteristika	Jednotka	Střední hodnota	Rozsah
Měrná hmotnost	[kg/m <sup>3</sup> ]	314,0	309,0-319,0
Spalné teplo	[MJ/kg]	19,0	14,0-24,0
Bod vzplanutí	[°C]	265,0	230,0-300,0

Pro výpočet účinnosti z hodnot měřených v systému bude zapotřebí znát také měrnou hmotnost (hustotu) používané dřevní štěpky. Jelikož při výpočtu spalného tepla  $q_{spal}$  počítáme se středními hodnotami jak spalného tepla, tak i obsahu uhlíku v palivu, je možné předpokládat, že i použití střední hodnoty měrné hmotnosti štěpky, uvedené v tabulce 4.3, bude vyhovující. Dle této tabulky je střední hodnota měrné hmotnosti dřevní štěpky  $\rho = 314 \text{ kg/m}^3$ .

#### Vstupní energie (pro $\eta_{celk}$ )

Energie vstupující do systému je popsána vztahem (4.12), pomocí něhož je počítán výkon paliva vstupujícího do kotle na biomasu. Výhřevnost štěpky je počítána dle vztahu (4.10), tedy v jednotkách  $\text{MJ/kg}$ .

$$P_{QD} = q_v * 10^6 * \rho_D * F1/3600 \text{ [J/s]} \quad (4.12)$$

#### Získaná energie (pro $\eta_{celk}$ )

Výstupem je elektrický výkon  $P_{el}$  v jednotkách  $W$  měřený na generátoru a množství tepla (původem z dřevní štěpky) dodávaného do topného systému, které je možné vyjádřit jako tepelný výkon  $P_{QTS}$  a určit podle vzorce (4.13). Součet průtoků  $(F3+F5)$  udává průtok vody do okruhu s topným systémem.

$$P_{QTS} = c_{VODA} * \rho_{VODA} * (F3 + F5) / 3600 * (T13 - T12) [J / s] \quad (4.13)$$

Do topného systému je teplo dodáváno zároveň i z plynových kotlů, které jsou zapojeny před vstupem do topného systému a využívány jako přídatný zdroj tepla pro pokrytí aktuální poptávky. Pro výpočet účinnosti okruhu využívajícího teplo získané spalováním dřevní štěpky však není nutné se výkonem těchto plynových kotlů zabývat.

### Celková účinnost (pro $\eta_{celk}$ )

S využitím vztahů (4.12) a (4.13) je možné stanovit celkovou účinnost technologie  $\eta_{celk}$  (vzorec (4.14)).

$$\eta_{celk} = \frac{P_{QTS} + Pel}{P_{QD}} [ ] \quad (4.14)$$

Ve výpočtu celkové účinnosti technologie podle vzorce (4.14) je zanedbána ztráta energie vzniklá tím, že teplo předané z termooleje do spalného vzduchu (za účelem přehřátí tohoto vzduchu) není užitečně zpracováno celé. Část energie předaná do spalného vzduchu, která není dále v kotli ani v ekonomizérech předána zpět do termooleje, je však s přihlédnutím k výkonovým parametrům celého zařízení tak malá, že je možné ji zanedbat.

## 4.1.2 Účinnost kotle na biomasu

Značkou  $\eta_k$  je v této práci označována účinnost samostatného kotle na biomasu (bez ekonomizérů využívajících teplo spalin).

### Vstupní energie

Energie je do kotle na biomasu dodávána jednak ve formě paliva (výpočet toku energie do kotle ve formě paliva označený  $P_{QD}$  uvádí vzorec (4.12)), jednak je nutné jako vstup započítat také energii obsaženou ve spalovacím vzduchu, který je do topeniště přiváděn. Spalovací vzduch je přehříván teplem z termoolejového okruhu ve výměníku termoolej/vzduch (ve schématu na obrázku 4.2 značen číslem I.4).

Tepelný výkon výměníku přehřívajícího spalovací vzduch ( $P_{Qvzduch}$ ) není možné stanovit přímým výpočtem z průtoku termooleje výměníkem a teplotního spádu termooleje na výměníku, jelikož tyto hodnoty nejsou měřeny. Jeho stavení je tedy

prováděno na základě znalosti jmenovitého výkonu tohoto výměníku. Na základě znalosti okamžitého výkonu technologického celku kotle s ekonomizérem 1 (tento výkon je měřen a označován  $P_1$ ) a jmenovité hodnoty výkonu tohoto celku (2875 kW), je možné stavit koeficient

$$koef = \frac{P_1}{2875} [ ] \quad (4.15)$$

který udává, na kolik procent jmenovitého výkonu je technologie právě provozována. Vynásobením jmenovitého výkonu předehřívače vzduchu (130 kW) tímto koeficientem získáme přibližnou hodnotu aktuálního výkonu tohoto předehřevu (vzorec (4.16)).

$$P_{Qvzduch} = koef * 130 * 10^3 [J / s] \quad (4.16)$$

Je zřejmé, že se hodnota výkonu předehřívače vzduchu v závislosti na aktuálním výkonu kotle nemění zcela lineárně, ale pro potřeby výpočtu účinnosti kotle je možné tuto úvahu považovat za vyhovující, jelikož nepřesnost, která tímto vznikne, je minimální.

### Získaná energie

Energie z paliva je za pomoci kotle převáděna na energii tepelnou a předávána jednak do termoolejového okruhu (popsáno tepelným výkonem  $P_{QK}$ ) a také chlazením roštu přímo do okruhu s vodou (tepelný výkon označený  $P_{QR}$ ).

$$P_{QR} = c_{VODA} * \rho_{VODA} * F_3 / 3600 * (T_{10} - T_{12}) [J / s] \quad (4.17)$$

Vzhledem k tomu, že je ve skutečnosti měřen pouze tepelný výkon kotle s ekonomizérem 1 (označován  $P_1$ ), bylo zapotřebí najít způsob, jak určit výkon samotného kotle na biomasu. První možností výpočet podle vzorce (4.18a), ve kterém je využito znalosti jmenovité hodnoty výkonu kotle (2500 kW) a stejné úvahy, jako u výpočtu výkonu předehřevu vzduchu ve vzorci (4.16).

$$P_{QK} = \frac{P_1}{2875} * 2500 * 10^3 [J / s] \quad (4.18a)$$

Druhý způsob popisuje vzorec (4.18b), ve kterém je využito znalosti teplotního spádu spalín na kotli. Zanedbáme-li tepelnou ztrátu z povrchu kotle do jeho okolí, je možné říci, že teplo v kotli odebrané ze spalín je rovno teplu kotlem předaného do termooleje (popsáno vztahem (4.19)).

$$P_{QK} = c_{SP(T_1, T_2)} * \rho_{SP} * F_{SP} * (T_1 - T_2) [J / s] \quad (4.19)$$

Hodnotu násobku  $\rho_{SP} * F_{SP}$  je možné určit na základě měřeného výkonu  $P_1$  a tomu odpovídajícímu teplotnímu spádu spalin na kotli s ekonomizérem 1 ( $T_1-T_2$ ). Jelikož je měrná tepelná kapacita spalin závislá na teplotě (z údajů v tabulce v literatuře [16] byl lineární aproximací získán vzorec pro její výpočet  $c_{SP}=0,0003T+1,0488$ ), je zapotřebí tuto skutečnost při výpočtech uvažovat. Pro zjednodušení je možné počítat průměrné  $c_{SP}$  vždy pro průměrnou hodnotu rozdílu teplot na daném výměníku.

$$c_{SP(T_1,T_3)} * \rho_{SP} * F_{SP} * (T_1 - T_3) = P_1 * 10^3 \rightarrow \rho_{SP} * F_{SP} = \frac{P_1 * 10^3}{(T_1 - T_3) * c_{SP(T_1,T_3)}} \quad (4.20)$$

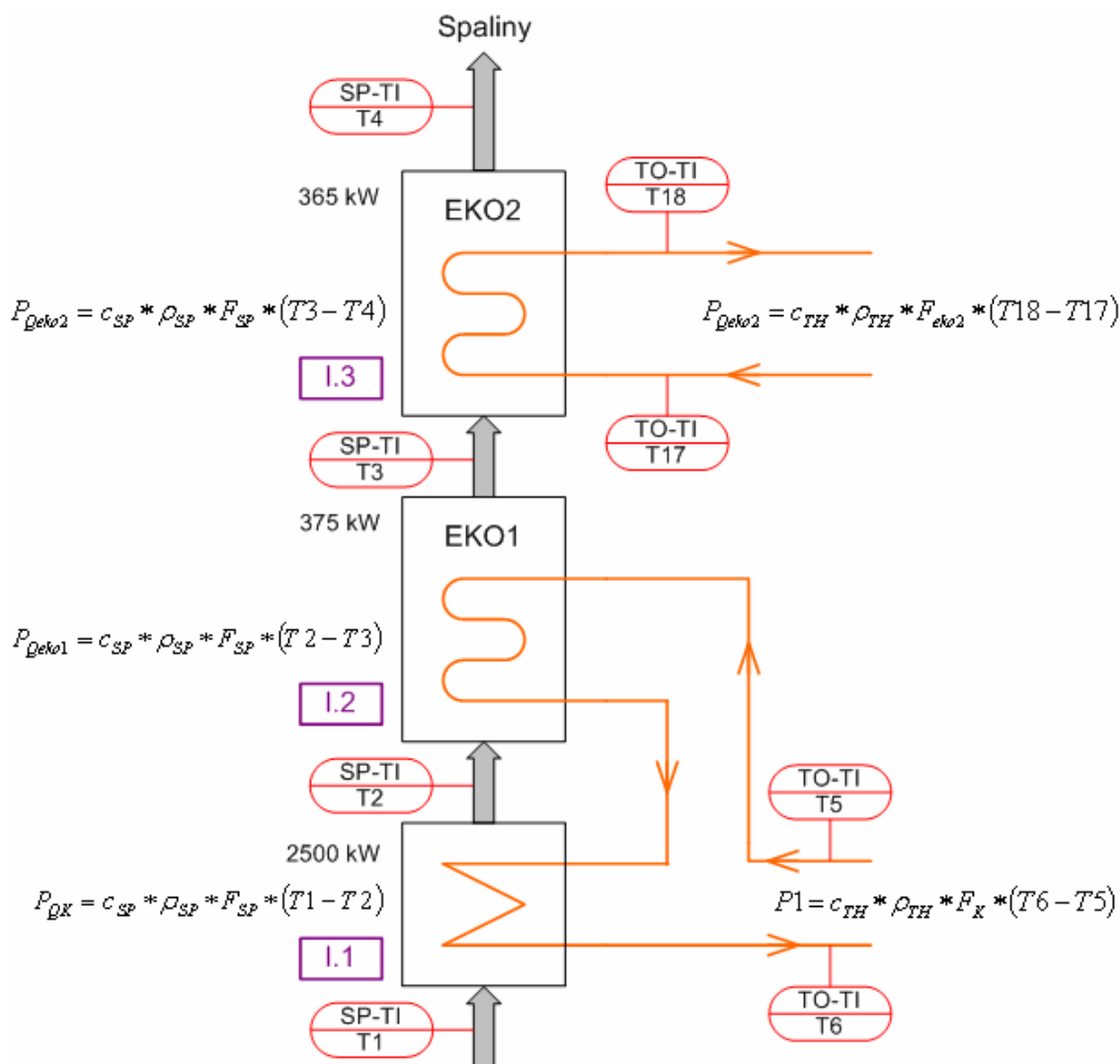
Vzorec (4.19) je poté možné upravit do podoby, kde pro výpočet výkonu kotle na biomasu vystupují pouze veličiny, které jsou známe.

$$P_{QK} = \frac{P_1 * 10^3 * c_{SP(T_1,T_2)}}{(T_1 - T_3) * c_{SP(T_1,T_3)}} * (T_1 - T_2) [J / s] \quad (4.18b)$$

#### Účinnost samostatného kotle $\eta_k$

Na základě vzorců (4.12), (4.16), (4.17) a (4.18) je možné stanovit účinnost samostatného kotle bez ekonomizérů podle vzorce (4.21).

$$\eta_k = \frac{P_{QK} + P_{QR}}{P_{QD} + P_{Qvzduch}} [ ] \quad (4.21)$$



Obrázek 4.1 Schéma kotle a ekonomizérů s vyznačením tepelných výkonů

### 4.1.3 Účinnost kotel na biomasu s ekonomizéry

Energie z paliva je do termoolejového okruhu předávána nejen kotlem, ale také dvojicí ekonomizérů využívajících k ohřevu teplotního média část tepelné energie spalin vycházejících z kotle na biomasu. Účinnost, která vypovídá o tom, jak velká část energie přiváděné do systému v palivu a ve spalovacím vzduchu je přeměněna na energii dále využívanou, je v této práci označována jako  $\eta_{KE}$ . Postup při jejím výpočtu je podobný výpočtu účinnosti kotle  $\eta_k$  z kapitoly 4.1.2 s tím rozdílem, že k získaným tepelným výkonům  $P_{QK}$  a  $P_{QR}$  je nutné přičíst také tepelný výkon ekonomizérů  $P_{Qeko1}$  a  $P_{Qeko2}$ .

### Vstupní energie (pro $\eta_{KE}$ )

Vstupní energie je stejná jako u určování výkonu samostatné kotle, jedná se tedy o teplo dodané ve formě dřevní štěpky, které je možné počítat ze vztahu (4.12), a teplo dodávané v předeřátém spalovacím vzduchu vyjádřené výkonem  $P_{Qvzduch}$  (vzorec (4.16)).

### Získaná energie (pro $\eta_{KE}$ )

Získané užitečné teplo je popsáno výkony  $P_{QR}$  (vzorec (4.17) - tepelný výkon kotle chlazením roštu vodou),  $P_1$  (tepelný výkon kotle s ekonomizérem 1) a tepelným výkonem ekonomizéru 2  $P_{Qeko2}$ . Stanovení tepelného výkonu  $P_{Qeko2}$  je možné dvěma způsoby analogicky s výpočtem  $P_{Qeko1}$ .

$$P_{Qeko2} = \frac{P_1}{2875} * 365 * 10^3 [J / s] \quad (4.22a)$$

$$P_{Qeko2} = \frac{P_1 * 10^3 * c_{SP(T3,T4)}}{(T1 - T3) * c_{SP(T1,T3)}} * (T3 - T4) [J / s] \quad (4.22b)$$

Jak bylo ověřeno výpočtem na konkrétních datech (kapitola 4.3), oba způsoby stanovení výkonu ekonomizéru vedou s přihlédnutím k udávané chybě měření ke správné výsledné hodnotě účinnosti a proto je možné použít kterýkoli z nich.

### Účinnost kotle na biomasu s ekonomizéry $\eta_{KE}$

$$\eta_{KE} = \frac{P_1 * 10^3 + P_{Qeko2} + P_{QR}}{P_{QD} + P_{Qvzduch}} [ ] \quad (4.23)$$

## 4.2 Účinnost ORC modulu na základě navrhovaných měření

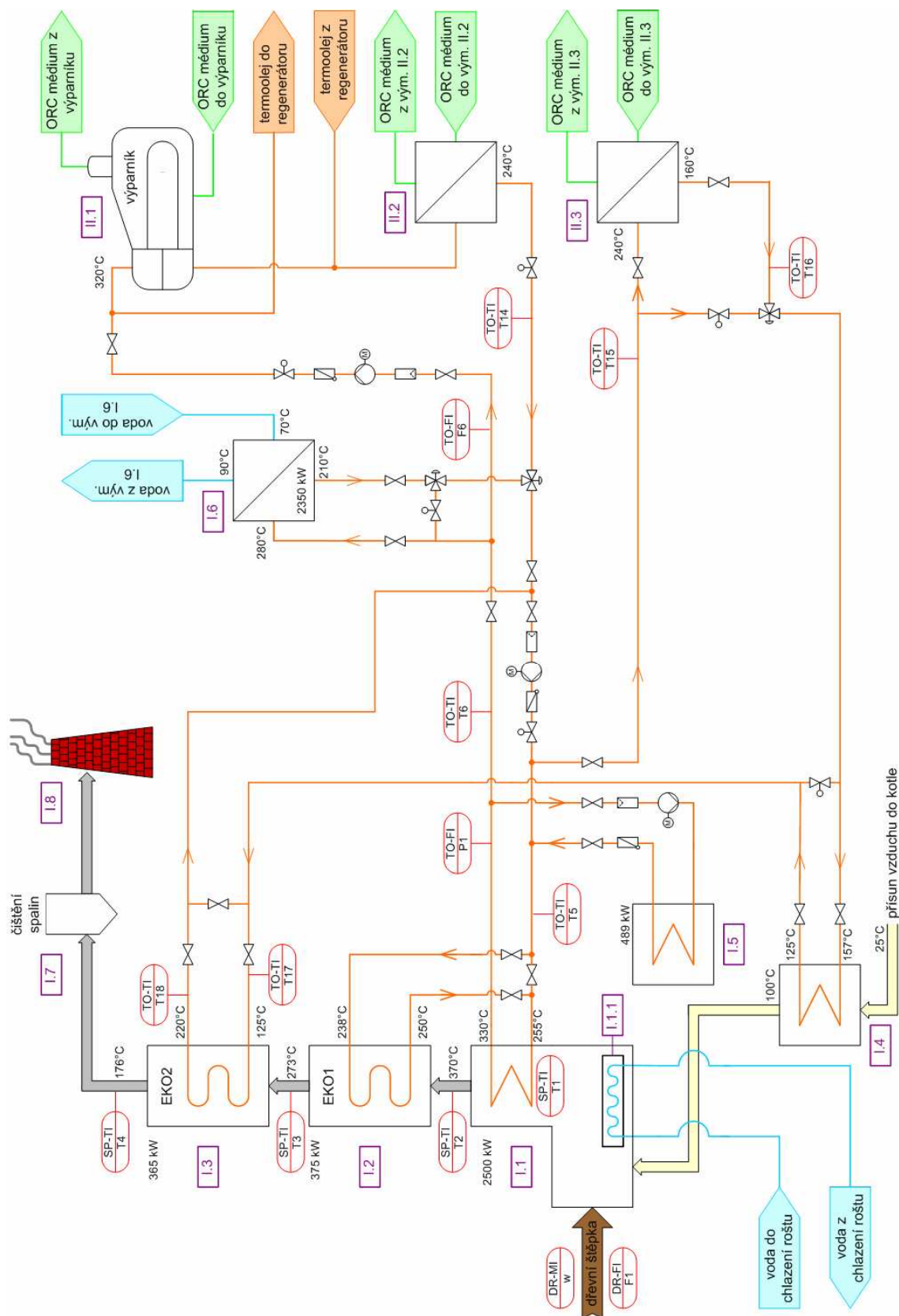
Na schématu termoolejového okruhu (obrázek 4.2) jsou pod označením T14 až T18 a F6 znázorněna čidla, ze kterých zadavatel zakázky naměřená data neposkytuje, přestože by bylo vhodné je mít pro výpočet účinnosti ORC modulu k dispozici. Veličiny, které by byly měřeny těmito čidly, jsou popsány v tabulce 4.4. Ostatní čidla, ze kterých naměřené hodnoty k dispozici jsou, již byla uvedena v tabulce 3.3.

**Tabulka 4.4 Označení navrhovaných čidel ve schématech a výpočtech**

Veličina [jednotky]		Značení ve výkresech	Značení ve schématech a výpočtech	Význam veličiny
Termoolej	Objemový průtok [m <sup>3</sup> /h]	-	F6	Průtok termooleje výměníkem II.2.
	Teplota [°C]	TO-TIR 110	T14	Teplota termooleje za výměníkem II.2.
		TO-TIR 120	T15	Teplota termooleje před výměníkem II.3.
		TO-TIR 121	T16	Teplota termooleje za výměníkem II.3.
		TO-TIR 123	T17	Teplota termooleje před ekonomizérem 2.
		TO-TIR 124	T18	Teplota termooleje za ekonomizérem 2.

Výběr požadovaných čidel, kterými by bylo vhodné získávat údaje pro výpočet účinností jednotlivých celků, byl uskutečněn s přihlédnutím k ekonomické stránce celé problematiky. Pokud by mělo být měření přesnější, bylo by zapotřebí přidat do technologie další čidla na měření průtoků a teplot, znát např. i množství vzduchu proudícího do kotle na biomasu, jeho chemické složení. Zajistit kontinuální měření všech těchto veličin by však bylo finančně náročné a proto se v běžném provozu neprovádí.





Obrázek 4.2 Zjednodušené schéma termoolejového okruhu s požadovanými měřicími místy

Výpočet účinnosti samotného ORC okruhu  $\eta_{ORC}$ , který bývá do systému zpravidla dodáván jako celek externí firmou, byl do této práce zařazen hlavně z důvodu snahy porovnat skutečné hodnoty účinnosti, kterých ORC zařízení dosahuje, s hodnotami udávanými výrobcí. Jelikož však hodnoty naměřené na reálném systému, které by bylo zapotřebí mít pro výpočet této účinnosti k dispozici, nebyly zadavatelem zakázky poskytnuty, je uveden pouze teoretický rozbor, jak by bylo vhodné uvedenou účinnost určovat.

### Vstupní energie (pro $\eta_{ORC}$ )

Do ORC okruhu je teplo předáváno z ohřátého termooleje přes výparník a dva výměníky (v obrázku 4.2 označenými čísly II.2 a II.3). Vstupní tepelný výkon  $P_{QORCin}$  by bylo možné určit pomocí vztahu (4.24).

$$P_{QORCin} = c_{TH} * \rho_{TH} * F_6 * (T14 - T6) + c_{TH} * \rho_{TH} * F_{eko2} * (T16 - T15) [J / s] \quad (4.24)$$

První část tohoto vzorce vyjadřuje tepelný výkon výparníku a výměníku II.2, druhá část tepelný výkon výměníku II.3. Průtok  $F_{eko2}$  je průtok výměníkem II.3, který je při standardním nastavení ventilů a klapek v okruhu shodný s průtokem termooleje přehřívačem vzduchu a také ekonomizérem 2. Pro určování tohoto průtoku bylo požadováno měření teplotního spádu na ekonomizéru 2 (teplotní čidla T17 a T18). Za pomoci těchto údajů a předpokladu, že teplo odebrané ekonomizérem 2 ze spalin procházejících tímto ekonomizérem je rovno teplu předanému tímto výměníkem do termooleje. Způsob určování průtok ekonomizérem 2, resp. výměníkem II.3, popisuje vzorec (4.25).

$$\begin{aligned} P_{Qeko2} &= c_{SP(T3,T4)} * \rho_{SP} * F_{SP} * (T3 - T4) \\ P_{Qeko2} &= \frac{P1 * 10^3 * c_{SP(T3,T4)}}{(T1 - T3) * c_{SP(T1,T3)}} * (T3 - T4) = c_{TH} * \rho_{TH} * F_{eko2} * (T18 - T17) \\ F_{eko2} &= \frac{P1 * 10^3 * (T3 - T4) * c_{SP(T3,T4)}}{(T1 - T3) * c_{SP(T1,T3)} * c_{TH} * \rho_{TH} * (T18 - T17)} [J / s] \end{aligned} \quad (4.25)$$

### **Získaná energie (pro $\eta_{ORC}$ )**

Z ORC okruhu vystupuje užitečná energie jednak ve formě elektrické energie  $P_{el}$  vyráběné za pomoci generátoru a dále jako teplo do okruhu s vodou určenou k vytápění.

$$P_{QORCout} = c_{VODA} * \rho_{VODA} * F5 / 3600 * (T8 - T7) [J / s] \quad (4.26)$$

### **Účinnost ORC**

Výslednou účinnost ORC zařízení je možné na základě vztahů (4.25) a (4.26) stanovit podle vzorce (4.27).

$$\eta_{ORC} = \frac{P_{QORCout} + P_{el}}{P_{ORCin}} [ ] \quad (4.27)$$

## **4.3 Příklad výpočtu účinností na základě naměřených dat**

Pro ukázkový výpočet byla vybrána data naměřená v reálném provozu dne 31. 3. 2007 v čase mezi 18:00 až 20:00. V této době byla technologie provozována bez větších výkonových výkyvů s hodnotami výkonu pohybujícími okolo hodnot pro technologii projektovaných. Průměrné hodnoty jednotlivých veličin za uvedené období, používané při výpočtu celkové účinnosti technologie, účinnosti kotle s ekonomizéry a samotného kotle, jsou uvedeny v tabulce 4.5.

Jelikož zadavatel zakázky neposkytl bližší informace o čidlech, kterými jsou veličiny měřeny, byly chyby měření uvedené u jednotlivých veličin odhadnuty podle toho, jakých hodnot by mohly dosahovat. Přihlíženo bylo také k tomu, jaké hodnoty jsou z jednotlivých čidel dodávány (např. hodnota F2 je dle naměřených hodnot udávána s větší odchylkou než ostatní průtoky). Postup pro výpočet odchylky určované hodnoty uvedený níže v této práci je však obecný. V případě dodání přesností jednotlivých čidel by tedy bylo možné chyby měření stanovit přesněji dle skutečných hodnot.

**Tabulka 4.5 Průměrné hodnoty vybraných veličin naměřených dne 31. 3. 2007 v čase 18:00 - 20:00 na technologii ve městě Schöneck**

Veličina [jednotky]		Značení ve schématech a výpočtech	Význam veličiny	Průměrná hodnota za dané období
Palivo	Vlhkost [%]	w	Vlhkost dřevní štěpky vstupující do kotle.	40±2
	Objemový průtok [m <sup>3</sup> /h]	F1	Objemový průtok dřevní štěpky do kotle.	7,2±0,4
Spaliny	Teplota [°C]	T1	Teplota nad topeništěm.	1000±10
		T2	Teplota spalin za kotlem, před ekonomizérem 1.	382±4
		T3	Teplota spalin mezi ekonomizéry 1 a 2.	266±3
		T4	Teplota spalin za ekonomizérem 2.	177±2
Termoolej	Tepelný výkon [kW]	P1	Teplo dodávané do systému kotlem a eko1.	2900±100
Voda	Objemový průtok [m <sup>3</sup> /h]	F2	Průtok vody plynovými kotli.	77±3
		F3	Průtok vody do chlazení roštu kotle na biomasu.	4,40±0,05
		F5	Průtok vody výměníkem voda/glykol.	94±1
	Teplota [°C]	T10	Teplota vody vystupující z chlazení roštu kotle	72,7±0,4
		T11	Teplota vody vstupující do topného systému.	81,7±0,5
		T12	Teplota vody vracející se z topného systému.	61,0±0,4
		T13	Teplota vody za plynovými kotli.	82,0±0,5
Elektrický výkon [kW]		P2	Elektrický výkon generátoru.	515±6

Po dosazení konkrétních hodnot z tabulky 4.5 do vztahů uvedených v kapitole 4.1 je výpočtem dosaženo hodnot uvedených níže.

### 4.3.1 Výpočet celkové účinnosti technologie pro zvolené časové období

Výhřevnost paliva

$$q_v = 18,8 * \frac{100 - w}{100} - 0,0244 * w \text{ [MJ / kg]}$$

$$q_v = 18,8 * \frac{100 - 39}{100} - 0,0244 * 39 = 10,5164 \text{ MJ / kg}$$

$$q_v = (10500 \pm 500) \text{ kJ / kg}$$

Teplo vázané v palivu vstupujícím do kotle

$$P_{QD} = q_v * \rho_D * \frac{F1}{3600} = \left( 18,8 * \frac{100 - w}{100} - 0,0244 * w \right) * 10^6 * \rho_D * \frac{F1}{3600} \text{ J / s}$$

$$P_{QD} = (6600 \pm 500) \text{ kJ / s}$$

Teplo předávané do topného systému

$$P_{QTS} = c_{voda} * \rho_{voda} * \frac{(F3 + F5)}{3600} * (T13 - T12) \text{ [J / s]}$$

$$P_{QTS} = (2400 \pm 100) \text{ kJ / s}$$

Výsledná celková účinnost technologie za období 31. 3. 2007 18:00 – 20:00

$$\eta_{celk} = \frac{P_{QTS} + Pel}{P_{QD}}$$

$$\eta_{celk} = (0,43 \pm 0,06)$$

### 4.3.2 Výpočet účinnosti kotle na biomasu pro zvolené časové období

Tepelný výkon chlazení roštu vodou

$$P_{QR} = c_{voda} * \rho_{voda} * \frac{F3}{3600} * (T10 - T12) \text{ [J / s]}$$

$$P_{QR} = (59 \pm 4) \text{ kJ / s}$$

Tepelný výkon předehřevu vzduchu

$$P_{Qvzduch} = \frac{P1}{2875} * 130 * 10^3 \text{ [J / s]}$$

$$P_{Qvzduch} = (131 \pm 4) \text{ kJ} / \text{s}$$

Tepelný výkon kotle na biomasu v termooleji (verze výpočtu a)

$$P_{QKa} = \frac{P1}{2875} * 2500 * 10^3 \text{ [J / s]}$$

$$P_{QKa} = (2500 \pm 100) \text{ kJ} / \text{s}$$

Tepelný výkon kotle na biomasu v termooleji (verze výpočtu b)

$$P_{QKb} = \frac{P1 * 10^3 * c_{SP(T1,T2)}}{(T1 - T3) * c_{SP(T1,T3)}} * (T1 - T2) \text{ [J / s]}$$

$$P_{QKb} = (2500 \pm 100) \text{ kJ} / \text{s}$$

Výsledek shodný pro obě verze výpočtu

$$P_{QK} = (2500 \pm 100) \text{ kJ} / \text{s}$$

Účinnost samostatného kotle na biomasu  $\eta_K$  za období 31. 3. 2007 18:00 – 20:00

$$\eta_k = \frac{P_{QK} + P_{QR}}{P_{QD} + P_{Qvzduch}}$$

$$\eta_K = 0,38 \pm 0,06$$

### 4.3.3 Výpočet účinnosti kotle s ekonomizéry pro zvolené časové období

Tepelný výkon ekonomizéru 2 (verze výpočtu a)

$$P_{Qeko2} = 365 * 10^3 * P1 / 2875 = 365 * 10^3 * 2900 / 2875 \text{ J / s}$$

$$P_{Qeko2} = (370 \pm 20) \text{ kJ} / \text{s}$$

Tepelný výkon ekonomizéru 2 (verze výpočtu b)

$$P_{Qeko2} = \frac{P1 * 10^3 * c_{SP(T3,T4)}}{(T1 - T3) * c_{SP(T1,T3)}} * (T3 - T4) = \frac{2900 * 10^3 * 1,12}{(1000 - 266) * 1,24} * (266 - 177) \text{ J / s}$$

$$P_{Qeko2} = (320 \pm 30) \text{ kJ} / \text{s}$$

Výsledná účinnost kotle s ekonomizéry za období 31. 3. 2007 18:00 – 20:00

$$\eta_{KE} = \frac{P_I \cdot 10^3 + P_{Qeko2} + P_{QR}}{P_{QD} + P_{Qvzduch}} = \frac{2900 + 320 + 59}{6500 + 131}$$

(oba způsoby výpočtu  $P_{Qeko2}$  vedou ke stejné výsledné hodnotě účinnosti)

$$\eta_{KE} = 0,49 \pm 0,06$$

#### 4.4 Chyby měření, statistická regulace [17], [18]

Při jakémkoli měření dochází k ovlivnění naměřené hodnoty zjišťované fyzikální veličiny chybami měření, které mohou být různého původu. Může se jednat o vlivy jako jsou vlastnosti měřicích přístrojů, použitá metoda měření, popř. chyby způsobené člověkem, který měření provádí.

Z tohoto důvodu je nutné u každého měření stanovovat přesnost, s jakou bylo toto měření prováděno. Naměřenou hodnotu není možné bez stanovení její přesnosti porovnávat s jiným naměřeným výsledkem. Důležitou součástí měření je tedy vždy analýza chyb, které ovlivnily nebo mohly ovlivnit výslednou naměřenou hodnotu.

Chyby měření je možné dělit podle několika různých hledisek:

- 🚦 dle původu - chyby měřicích přístrojů, chyby osobní, chyby pocházející z použité metody
- 🚦 dle charakteru – náhodné, systematické
- 🚦 dle typu – absolutní, relativní
- 🚦 dle pravděpodobnosti, s jakou fyzikální veličinu naměříme při dalším měření - chyby maximální, chyby krajní, nepravděpodobné

##### Chyby náhodné

Chyby náhodné se projevují tak, že při vícenásobném měření téže fyzikální veličiny za zdánlivě stejných podmínek je dosaženo navzájem se lišících výsledků. Původ těchto skutečností spočívá v ne zcela kontrolovatelných vlivech vnějších, jako jsou např. vibrace, tlak, vlhkost vzduchu, a vnitřních (kolísání měřené veličiny, tepelný šum atd.). Tyto vlivy se při každém jednotlivém měření navzájem kombinují a způsobují zmiňované odchylky jednotlivých měření.

**Chyby systematické**

Systematickými, neboli soustavnými nazýváme chyby zkreslující výsledek měření „jednosměrně“. Jsou dány metodou měření (tzv. chyba metody), kvalitou měřicích přístrojů (tzv. přístrojová chyba, kterou lze na základě údajů od výrobce přístroje odhadnout) a kvalitou prováděných měření (tzv. osobní chyba). Na rozdíl od náhodných chyb lze systematické chyby odhalit a odhadnout jejich velikost. Systematické chyby nelze odstranit výpočtem.

**Chyby hrubé**

Může se stát, že se mezi naměřenými hodnotami vyskytne údaj, který se na první pohled výrazně liší od očekávané hodnoty. Takováto chyba se nazývá hrubá a nejčastěji vzniká nepozorností měřící osoby, chybou měřicího přístroje nebo jiným netypickým ovlivněním měřené hodnoty. Takovéto chyby je nutné ze souboru naměřených dat vyřadit, aby neovlivňovaly výslednou hodnotu měřené veličiny.

Ve výpočtech chyb uvedených v této práci je předpokládáno, že vzhledem k chybě měřidla lze ostatní chyby zanedbat. Chyby měřidla v sobě zahrnují vedle chyby systematické i složku chyby náhodné.

**4.4.1 Zákon hromadění chyb (chyby nepřímých měření)**

Veličiny přímo naměřené, u nichž jsou odhady a nejistoty známy, jsou dále dosazovány do fyzikálních vztahů za účelem výpočtu požadované fyzikální veličiny. Konkrétně v problematice, kterou se zabývá tato práce, jsou dosazovány přímo naměřené hodnoty teploty a průtoku do vztahů pro výpočet účinnosti technologie.

Obecně je možné říci, že pokud výsledná veličina  $Y$  je dána funkcí přímo měřených veličin  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ), tedy platí  $Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ , hodnota fyzikální veličiny  $\bar{Y}$  je počítána dosazením do funkční závislosti  $\bar{Y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_n)$ . Jednotlivé hodnoty měření  $x_i$  jsou k dispozici včetně chyb, tedy  $x_i = (\bar{x}_i \pm \delta(x_i))$ , kde  $\bar{x}_i$  je aritmetický průměr a  $\delta(x_i)$  je chyba měření. Tato chyba může být jakéhokoliv druhu (směrodatná odchylka, krajní chyba, největší přípustná



chyba). Pro další zpracování je ovšem nutné, aby všechny tyto chyby  $\bar{\delta}(x_i)$  všech hodnot  $x_i$  byly stejného druhu.

Výslednou chybu  $\bar{\delta}(Y)$  veličiny  $Y$  je možné určit buď ze vztahu

$$\bar{\delta}(Y) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \bar{\delta}^2(x_1) + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 \bar{\delta}^2(x_2) + \left(\frac{\partial f}{\partial x_3}\right)^2 \bar{\delta}^2(x_3) + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 \bar{\delta}^2(x_n)}$$

který se nazývá kvadratickým (Gaussovým) zákonem hromadění chyb nebo ze vztahu

$$\bar{\delta}(Y) = \left| \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right) \bar{\delta}(x_1) \right| + \left| \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right) \bar{\delta}(x_2) \right| + \left| \left(\frac{\partial f}{\partial x_3}\right) \bar{\delta}(x_3) \right| + \dots + \left| \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right) \bar{\delta}(x_n) \right|$$

nazývaného lineárním zákonem hromadění chyb.

Pro výpočet výsledné směrodatné odchylky určované účinnosti je v této práci využíváno Gaussova kvadratického zákona hromadění chyb.

#### 4.4.2 Statistická regulace [19], [21]

Problematika zpracovávaná v této diplomové práci vede k výpočtům, které jsou prováděny na základě velkého množství dat naměřených v reálném provozu. Na tato naměřená data je z důvodu eliminace vlivu chyb naměřených hodnot na počítanou veličinu vhodné aplikovat statistickou regulaci, pomocí které je možné detekovat mezi naměřenými hodnotami chybné údaje způsobené tzv. vymezitelnými (zvláštními) příčinami. Na základě principů statistické regulace takto detekované hodnoty je dále možné na základě pravidel stanovených dle konkrétní aplikace nahradit odpovídajícími hodnotami.

Jednou z hlavních funkcí regulačních diagramů je tedy poskytnout statistický signál, když začne působit vymezitelná příčina, a vyhnout se tomuto signálu, pokud k žádné nežádoucí změně v procesu nedošlo (v takovém případě nazýváme proces statisticky zvládnutý). Rozhodnutí o statistické zvládnutosti procesu umožňují 3 základní čáry: CL, LCL a UCL. CL je označována střední čára (*ang. Central Line*) a odpovídá tzv. referenční (požadované) hodnotě použité znázorňované charakteristiky. UCL (*ang. Upper Control Limit*) a LCL (*ang. Lower Control Limit*) jsou regulační meze, které rozhodují o zvládnutosti procesu. Jejich stanovení je velice důležité, jelikož mají vliv na účinnost aplikované regulace.

Pro danou problematiku byl jako vyhovující vybrán a aplikován druh diagramu nazývaný dynamický diagram EWMA s jednokrokovou predikcí (EWMA je zkratka ang. názvu *Exponentially Weighted Moving Average*, neboli exponenciálně vážený klouzavý průměr, někdy také zvaný exponenciální zapomínání či GMA – ang. *Geometric Moving Average*). Tento typ diagramu je často využíván k regulaci procesů v energetice i v dalších průmyslových odvětvích.

### Regulační diagramy EWMA

Diagram EWMA pracuje s testovým kritériem  $Y_k$ , jehož hodnota po  $k$ -tém výběru je definována vztahem (4.30).

$$y_k = (1 - \lambda) \cdot y_{k-1} + \lambda \cdot f(x_k) \quad (4.30)$$

(pro  $0 < \lambda < 1, y_0 = Y_0$ )

kde význam jednotlivých veličin je následující:

$k$  je pořadí výběru

$Y_0$  je požadovaná úroveň parametru rozdělení regulované veličiny.

$\lambda$  parametr určující vlastnosti zapomínání

$f(x_k)$  hodnota zvolené výběrové charakteristiky v  $k$ -tém výběru.

### Dynamický regulační diagram EWMA

Dynamický regulační diagram EWMA je modifikací regulačního diagramu EWMA a umožňuje realizovat statistickou regulaci v procesech, ve kterých hodnoty sledované veličiny vykazují vlastnosti pozitivní autokorelace a proces má nekonstantní střední hodnotu s pomalými změnami. Překročení regulačních mezí způsobí v tomto diagramu pouze náhlá změna střední hodnoty, malé změny procesu diagram toleruje.

Způsob stanovení hodnot  $EWMA_k$  pro dynamický EWMA diagram udává vztah (4.31).

$$EWMA_k = EWMA_{k-1} + \lambda \cdot (x_k - EWMA_{k-1}) = EWMA_{k-1} + \lambda \cdot e_k \quad (4.31)$$

$$EWMA_0 = Y_0$$

Význam veličin použitých ve vzorci (4.31) je následující:

$EWMA_k$  je jednokroková predikce  $(k+1)$  hodnoty regulované veličiny, která je počítána v časovém okamžiku  $t_{k-1}$  ( $\hat{x}_{k+1}$ ),

$EWMA_{k-1}$	je predikce k-té hodnoty regulované veličiny, která je počítána v časovém okamžiku $t_{k-1}$ ( $\hat{x}$ ),
$x_k$	je skutečná naměřená k-tá hodnota regulované veličiny,
$e_k$	je chyba predikce k-té hodnoty regulované veličiny, $e_k = x_k - \hat{x}_k$
$\lambda$	je konstanta určující míru zapomínání EWMA ( $0 < \lambda < 1$ )
$Y_0$	je cílová hodnota pro polohu procesu

### Sestrojení a analýza dynamického diagramu EWMA

Při aplikaci dynamického diagramu EWMA je nutné postupovat následujícím způsobem:

1) Ověření závislosti dat a analýza chování procesu

Nejprve je nutné zjistit, zda u regulovaného procesu existuje pozitivní autokorelace a jestli změny střední hodnoty, resp. rozptylu nejsou příliš rychlé.

2) Stanovení parametru  $\lambda$

Stanovení optimálního parametru „zapomínání“  $\lambda$ , pro které je suma čtverců chyb jednokrokové predikce  $\sum_{k=1}^n e_k^2$  co nejmenší (n je počet naměřených hodnot regulované veličiny použitých k určování optimální hodnoty  $\lambda$ , doporučováno  $n \geq 50$ ).

3) Odhad  $\sigma_p$

$\sigma_p$  je směrodatná odchylka rozdělení chyb jednokrokové predikce  $e_k$ . Tuto odchylku je nutné určit, jelikož je dále používána pro stanovení mezí regulačního diagramu.  $\sigma_p$  je možné odhadnout pomocí vztahu (4.31).

$$\hat{\sigma}_p = \sqrt{\frac{\left[ \sum_{k=1}^n e_k^2 \right]_{opt}}{n-1}} \quad (4.31)$$

V tomto vzorci je čítec ve zlomku pod odmocninou suma čtverců chyb jednokrokové predikce pro optimální  $\lambda$  a  $n$  je počet naměřených hodnot regulované veličiny použitých ke stanovení hodnoty čitatele.

4) Stanovení hodnot střední čáry a regulačních mezí

V dynamickém diagramu EWMA se nepoužívá střední příčka, jako je tomu u často používaných statických diagramů (např. Shewhartova), ale střední čára, jelikož jsou jak tato střední čára tak i obě meze proměnné. Je možné je určit ze vztahů:

$$CL_k = \hat{y}_k = EWMA_{k-1} \quad (4.32)$$

$$LCL_k = \hat{y}_k - u_{1-\alpha/2} \cdot \hat{\sigma}_p = EWMA_{k-1} - u_{1-\alpha/2} \cdot \hat{\sigma}_p \quad (4.33)$$

$$UCL_k = \hat{y}_k + u_{1-\alpha/2} \cdot \hat{\sigma}_p = EWMA_{k-1} + u_{1-\alpha/2} \cdot \hat{\sigma}_p \quad (4.34)$$

kde  $u_{1-\alpha/2}$  je kvantil normovaného normálního rozdělení.

Pro riziko zbytečného signálu  $\alpha = 0,0027$  se hodnota kvantilu  $u_{1-\alpha/2}$  rovná 3.

#### 5) Analýza diagramu

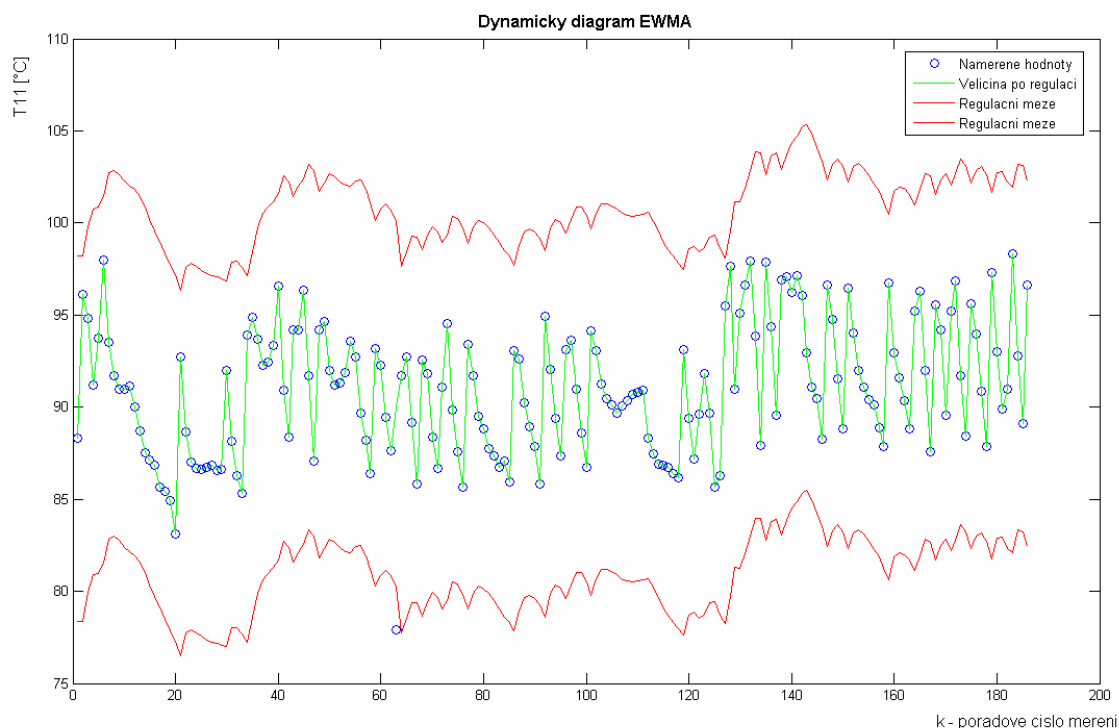
V diagramu vytvářeného podle bodů 1)-4) zbývá již pouze sledovat, zda se naměřené hodnoty sledované veličiny  $x_k$  vyskytují uvnitř regulačních mezí (takový proces je nazýván statisticky zvládnutým) a v případě potřeby provést odpovídající zásah (pokud proces statisticky zvládnutý není).

V softwaru vytvořeném pro účely této diplomové práce je využito právě tohoto dynamického diagramu EWMA. V případě, že se některá z hodnot regulované veličiny nevyskytuje uvnitř regulačních mezí, je vyřazena a nahrazena predikcí  $k$ -té hodnoty regulované veličiny  $EWMA_{k-1}$  (pro niž platí vztah (4.32)). Tento postup byl zvolen na základě předpokladu, že takovéto nahrazení bude eliminovat chybu původní hodnoty veličiny. Na základě výsledků, které byly získány vyzkoušením této teorie na vzorcích naměřených dat, byl tento postup shledán jako vyhovující.

V případě potřeby statistické regulace v průmyslu by bylo možné využít také některého z komerčních softwarových nástrojů zajišťujících vysokou přesnost regulace daného procesu. Cena takového softwaru se však pohybuje v řádech desítek až stovek tisíc korun, a proto je nutné zvážit, zda je takováto investice pro danou problematiku nutná. Jako příklad je možné uvést produkty firmy TriloByte Statistical Software, spol. s r. o. [20], která se zabývá právě vývojem a distribucí software pro statistickou analýzu.

Pro účely této diplomové práce je však možné regulaci za pomoci algoritmu, vytvořeného jako součást programu pro výpočet účinnosti, označit za plně dostačující.

Na obrázku 4.3 je uveden příklad využití dynamického diagramu EWMA, aplikovaného ve vytvořeném programu, pro hodnoty teploty topné vody T11 naměřené v období 22. 2. 2007 20:00 – 24.2.2007 20:00.










**Obrázek 4.3 Ukázka dynamického diagramu EWMA aplikovaného na konkrétní naměřená data**

## 5 Zpracování naměřených dat, software

Naměřená data ze systému jsou zadavatelem zakázky poskytována ve formátu \*.xls, tedy formátu běžně používaném programem Microsoft Excel. Prvních deset řádků obsahuje v jednotlivých souborech je vždy shodný - obsahují popis jednotlivých sloupců. Od jedenáctého řádku začínají vlastní naměřená data. Na každém dalším řádku jsou zachyceny hodnoty pro jednotlivá čidla vždy s časovým odstupem 15-ti minut.

Soubory jsou generovány ne zcela pravidelně, ale pro každou novou naměřenou sérii dat pro danou čtvrt hodinu je vygenerován nový soubor, obsahující všechna dosud naměřená data za aktuální den. Název souboru je generován automaticky na základě aktuálního času vytvoření souboru ve formátu „ME\_DD’MM’YYYY HH’MM’Ss“ (např. ME\_01’08’2006 12’20’35 – tento soubor by obsahoval naměřená data od počátku dne 1. 8. 2006, poslední záznam by byl z 12:15 hodin tohoto dne). Pro každý den by tedy mělo být k dispozici 96 souborů, přičemž soubor vygenerovaný jako poslední obsahuje všechna naměřená data za příslušný den.

Hlavním úkolem této práce je výpočet účinnosti technologie z těchto naměřených dat pro zvolené časové období. V následujícím seznamu jsou uvedeny hlavní kroky, které bylo postupně nutné vyřešit pro splnění úkolu:

-  způsob zadání časového období pro výpočet účinnosti uživatelem,
-  nalezení názvu existujících souborů obsahujících co největší množství naměřených dat za dané období,
-  načtení dat naměřených v daném období z vybraných souborů
-  korekce hrubých chyb v naměřených datech,
-  statistické zhodnocení naměřených dat a jejich statistická regulace – odstranění dalších chyb a nepřesností měření,
-  samotný výpočet účinnosti z připravených dat,
-  prezentace výsledku uživateli.

Pro realizaci zpracování dat bylo využito programovacího prostředí Matlab 7, pro vytvoření pomocného programu pro načtení dat za požadované období byl zvolen Microsoft Visual C# 2005 Express Edition, programovací jazyk C#.

Původním záměrem bylo vytvořit program v jazyce C# a Matlab využít jako subjektivně přehlednější prostředek pro ověřování funkčnosti vytvářených algoritmů.

Jelikož však došlo ke zdržení vypracování diplomové práce, při jejím dokončování již bylo zřejmé, že vytvořený program nebude využit pro výpočet účinnosti přímo v provozu spalovny. Z tohoto důvodu byla ponechána hlavní část programu v kódu Matlabu. Tato skutečnost umožňuje vytvořený program poměrně snadno modifikovat na základně případných dalších požadavků nebo při změně struktury vstupních souborů s daty. Kód tohoto programu je přehledný a mělo by být možné snadno se v něm zorientovat. Jsou v něm uvedeny podrobné komentáře popisující jednotlivé prováděné kroky. Kvůli jeho rozsahu není zdrojový kód součástí tištěné verze této práce, je možné jej nalézt na přiloženém CD v adresáři *Program*.

Dále je nutné uvést také skutečnost, že za pomoci toolboxu nazývaného Matlab Compiler by bylo v případě potřeby spouštění programu na počítači bez instalace Matlabu možné vytvořit ze zdrojového kódu samostatně spustitelnou aplikaci.

## **5.1 Postup výpočtu účinnosti za pomoci programu**

### **5.1.1 Hardwarové a softwarové nároky**

Naměřená data jsou dodávána v souborech formátu *\*.xls*. K načítání dat z těchto zdrojových souborů je využíván pomocný program vytvořený v jazyce *C#*, komunikující s programem Microsoft Excel. Základním požadavkem pro běh této *.NET* aplikace je běhové prostředí *.NET framework*, nejlépe verze 2.0 (dostupné na adrese [www.microsoft.com/downloads](http://www.microsoft.com/downloads)).

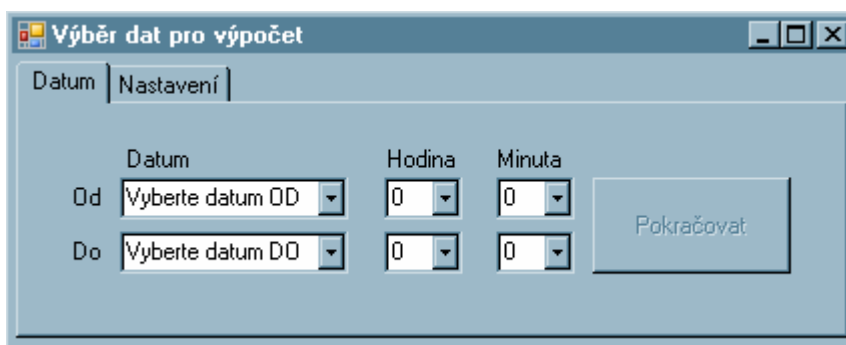
Pro zajištění možnosti načítání zdrojových dat ze souborů *\*.xls* je nutná instalace programu Microsoft Excel a jeho aktualizace *Primary Interop Assemblies* umožňující *.NET* aplikacím využívat objektový model sady Office. Funkčnost vytvořeného programu byla ověřena pro následující konfiguraci systému: Windows XP SP2, Microsoft Excel 2003 a jeho aktualizace *Office 2003 PIA*, běhové prostředí *.NET framework 2.0*. Tato konfigurace je také doporučena.

Ke spuštění hlavní části programu pro výpočet účinnosti je zapotřebí program Matlab 7.0., jehož minimální doporučené hardwarové nároky jsou procesor Pentium III, 512 MB RAM a 450 MB volného místa na pevném disku. V případě potřeby využití programu na PC, kde není Matlab nainstalován, je možné z připraveného kódu za pomoci toolboxu Matlab Compiler vytvořit samostatně spustitelný program.

V místě, pro které byl vytvořený program určen, je k dispozici počítačová sestava značky Fujitsu-Siemens s procesorem Pentium IV a operační pamětí 1024 MB, což je pro provoz výše uvedeného softwaru plně vyhovující konfigurace.

### 5.1.2 Zadání časového období pro výpočet a příprava dat

Po spuštění programu nazvaného *Start* v prostředí Matlabu je zavolán pomocný program, jehož uživatelské rozhraní je velice jednoduché a intuitivní (obrázek 5.1).



Obrázek 5.1 Uživatelské rozhraní programu pro výběr časového období pro výpočet

Komponenty combobox pro výběr data nabízejí všechna data, pro která jsou ve vybraném zdrojovém adresáři k dispozici soubory s naměřenými hodnotami (ta byla získána načtením všech názvů souborů v pracovním adresáři a načtením znaků z názvů těchto souborů, odpovídajících datu vytvoření). Po zadání požadovaného časového rozmezí a kliknutí na tlačítko „Pokračovat“ dojde k vytvoření seznamu souborů, které budou potřeba pro načítání dat (pro každé datum spadající do výběru vybrán poslední generovaný soubor).

Dále jsou soubory z připraveného seznamu postupně otvírány a naměřená data z nich jsou ukládána do nově vytvářeného souboru s názvem „TempData.xls“. Tento pomocný soubor je vytvořen a uložen do pracovního adresáře, který měl uživatel možnost změnit v programu v záložce *nastavení – pracovní adresář* (pozn.: v případě jeho změny je nutné v M-filu v Matlabu změnit cestu ke zdrojovým datům na stejnou, do uvedeného adresáře musí mít daný uživatel možnost zapisovat). Poté je program pro vytvoření zdrojového souboru s požadovanými daty ukončen.



### 5.1.3 Eliminace hrubých chyb měření, statistická regulace

V Matlabu jsou data z takto vytvořeného souboru načtena do proměnné *data* a dále zpracovávána. Nejprve je na ně aplikována funkce *GetRelevantData* (soubor *GetRelevantData.m*), ve které dojde ke kontrole hodnot naměřeného tepelného výkonu. Jelikož by technologie měla běžet kontinuálně, je celý software vytvořen pro výpočet účinnosti pro provoz s běžnými provozními výkyvy výkonu. Naměřené hodnoty nestandardních situací, kdy technologie je odstavena, dochází k jejímu náběhu či odstavování, jsou z podkladů pro výpočet odebírány na základě hodnoty aktuálního tepelného výkonu.

Vzhledem k poměrně častým výpadkům měření vlhkosti štěpky, resp. k uvedeným nereálným hodnotám, jsou tyto hodnoty kontrolovány a v případě nereálné hodnoty je tato nahrazena nejbližší předchozí naměřenou hodnotou, která odpovídá reálné skutečnosti.

Vlhkost dřevní štěpky, která je připravena před kotlem ke vstupu do topeniště, je měřena ve stejnou dobu jako ostatní veličiny v systému. Jelikož se naměřená hodnota vlhkosti tohoto paliva projeví až při jeho spalování, je nutné při výpočtu účinnosti v určitém čase počítat s vlhkostí naměřenou v nejbližším předchozím měření. Tato skutečnost je softwarově ošetřena tak, aby byly výpočty prováděny přesně na základě dat, která k sobě patří.

Dále jsou naměřené hodnoty teplot, výkonu a průtoků předloženy algoritmu, který provede jejich statistickou regulaci. Bližší informace o této problematice a způsobu jejího využití v této práci je možné nalézt v kapitole 4.4.2.

### 5.1.4 Výpočet účinností na základě připravených dat a zobrazení výsledků

Z dat upravených již uvedeným způsobem jsou dále vypočítány průměrné hodnoty pro každou měřenou veličinu a tyto hodnoty jsou uloženy do proměnné *averData* vždy do stejného sloupce, jako byly odpovídající naměřené veličiny v datovém souboru.

V dalších výpočtech už jsou používány přímo tyto průměrné hodnoty, protože všechny jsou vztaženy ke stejnému časovému období a výpočet s jejich průměrnou

hodnotou je dostatečný pro určení celkové účinnosti. Způsob výpočtu účinností je popsán v kapitole 4.1 a 4.3.

Vypočítané účinnosti jsou vypsány v hlavním okně programu Matlab a zároveň jsou graficky znázorněny pomocí koláčových grafů. V nich je červenou barvou označena část energie paliva dodaného do systému, která nebyla užitečně zpracována a zelenou barvou energie využita k vytápění objektů nebo generátorem převedená na energii elektrickou.

### 5.1.5 Příklady výsledků získaných výpočtem a jejich analýza

V tabulce 5.1 jsou uvedeny účinnosti vypočítané vytvořeným programem pro náhodně vybraná časová období, pro něž byla k dispozici naměřená data.

**Tabulka 5.1 Účinnosti vypočítané za náhodně vybraná období**

Datum a čas OD	Datum a čas DO	$\eta_{celk}$ [%]	$\eta_K$ [%]	$\eta_{KE}$ [%]
5.1.2007 12:00	7.1.2007 12:00	46	29	48
7.1.2007 12:00	9.1.2007 12:00	37	32	42
9.1.2007 12:00	11.1.2007 12:00	35	30	35
18.1.2007 0:00	23.1.2007 23:45	47	38	46
19.1.2007 8:00	19.1.2007 16:00	38	34	41
22.2.2007 20:00	24.2.2007 20:00	48	38	48
31.3.2007 18:00	31.3.2007 20:00	43	37	48
1.4.2007 0:15	1.4.2007 23:45	43	37	48

Hodnoty účinností získaných výpočtem pomocí vytvořeného programem je možné považovat za uspokojující a je lze konstatovat, že odpovídají předpokladům. Je nutné brát v úvahu, že výsledná hodnota všechny tří počítaných účinností je závislá na různých okolnostech, zejména pak na kvalitě dodávaného paliva. Vlivem výpočtu výhřevnosti paliva dle vzorce, který je přizpůsoben průměrným vlastnostem paliva

dlouhodobě dodávaného, může tato hodnota výslednou hodnotu účinnosti částečně zkreslovat.

Účinnost samotného kotle na biomasu se ve vybraných případech uvedených v tabulce 5.1 pohybuje mezi hodnotami 29-38%. Tuto hodnotu dále zvyšují ekonomizéry využívající část tepla ze spalín vycházejících z kotle tak, že ho předávají, stejně jako kotel, do termoolejového okruhu. Účinnost celku kotle s ekonomizéry se v uvedených případech pohybuje v rozmezí 35-48%, ekonomizéry tedy zvyšují účinnost o cca 5-10%.

Situace, kdy vypočítaná účinnost kotle s ekonomizéry a účinnost celé technologie dosahuje shodné hodnoty nebo je dokonce účinnost celé technologie vypočítána o procento vyšší, je pravděpodobně způsobena nepřesností čidel, jimiž jsou hodnoty teplot a průtoků v technologii měřeny. Touto problematikou se podrobněji zabývá kapitola 4.3 a také kapitola 4.4, kde jsou uvedeny ukázkové výpočty i s určováním odchylek vypočítaných veličin.

Minimální rozdíl mezi vypočítanou účinností kotle s ekonomizéry a účinností celé technologie poukazuje na vysokou účinnost ORC modulu, pro jejíž výpočet nebyla k dispozici naměřená data. Výrobci udávané vysoké hodnoty maximální účinnosti tohoto modulu, 96-97%, je tak dle výpočtů z naměřených dat možné dosáhnout i v reálném provozu.

Pro komplexní zhodnocení dosahovaných hodnot účinností by bylo zapotřebí porovnávat výsledky výpočtů z dat naměřených v průběhu celého kalendářního roku. Je totiž možné předpokládat, že v teplých letních měsících mohou nastávat situace, kdy vlivem nedostatečného odběru tepla spotřebiteli bude nutné častěji využívat dochlazovací okruh, čímž se účinnost celé technologie bude snižovat.

# Závěr

K cílům této diplomové práce náleželo popsat základní princip technologie Organického Rankinova cyklu a vytvořit přehled jejích aplikací v České republice. Dále pro konkrétní technologii provozovanou v německém městě Schöneck sestavit na základě technických výkresů zjednodušené blokové schéma. Po jeho komparaci s naměřenými daty poskytnutými provozovatelem technologie stanovit způsob určování účinnosti jednotlivých technologických celků. Také bylo nutné provést analýzu struktury měření související s výpočty účinností a přesností měření. Následně vypracovat program pro výpočet účinnosti vybraných technologických celků pro zvolenou dobu měření s využitím hodnot z reálného provozu, včetně korekce chyb měření a neurčitostí.

V úvodní části diplomové práce byl nastíněn princip technologie Organického Rankinova cyklu, jeho hlavní výhody a nevýhody. Dále byly uvedeny základní údaje a charakteristické znaky technologií provozovaných na území České republiky. Zvláštní pozornost je dále věnována ORC technologii v německém městě Schöneck, kterou se zabývá převážná část této diplomové práce. Podle technických výkresů a souborů s daty naměřenými v reálném provozu byla sestavena zjednodušená schémata technologie s označením měřicích míst. Na základě těchto poznatků bylo vyhodnoceno, že účinnost je možné počítat pro tři technologické celky: samostatný kotel na biomasu, kotel na biomasu s ekonomizéry a celou technologii. Původním záměrem bylo určovat účinnost také samotného ORC modulu. Pro tento výpočet však datové soubory z měření neobsahovaly hodnoty z čidel, které by bylo zapotřebí mít k dispozici. Proto je v této práci uveden doporučený způsob výpočtu účinnosti ORC modulu a v programu není na konkrétních datech realizován.

Pro určování uvedených účinností na základě naměřených dat byl připraven program, jenž pro uživatelem zvolený časový úsek tyto tři účinnosti vypočítá. Před samotným výpočtem také provede úpravu dat, aby získané výsledky byly co nejméně ovlivněny chybami měření. Úpravu dat provádí eliminací případných hrubých chyb a aplikací statistické dynamické regulace EWMA na naměřené hodnoty, jejíž princip je blíže popsán v textu práce.

Funkčnost programu byla ověřena výpočtem na základě dat naměřených v reálném provozu. Z výsledků získaných výpočtem na náhodně vybrané skupině dat

vyplývá, že se průměrná účinnost kotle na biomasu s ekonomizéry pro analyzované období pohybovala okolo 38%, přičemž o dalších cca 8%, tedy na výsledných 46%, zvýšily tuto hodnotu ekonomizéry využívající část tepla ze spalín vycházejících z kotle. Průměrná celková účinnost technologie se s účinností kotle s ekonomizéry téměř shodovala, což bylo pravděpodobně způsobeno nepřesnostmi naměřených veličin (předpokládána byla účinnost kotle minimálně o cca 2-3% vyšší oproti účinnosti celé technologie).

Minimální rozdíl mezi těmito dvěma účinnostmi však poukazuje na vysokou účinnost ORC modulu, pro jejíž výpočet nebyla k dispozici naměřená data. Výrobci udávané vysoké hodnoty maximální účinnosti tohoto modulu, 96-97%, je tak dle výpočtů z naměřených dat možné dosáhnout i v reálném provozu.















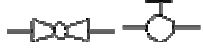
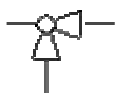



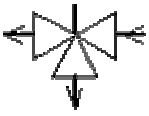
## Použitá literatura

- [1] Obernberger, I. – Thonhofer, P. – Reisenhofer, E. *Description and evaluation of the new 1000kWe ORC process integrated in the biomass CHP plant in Lienz*. [online]. [20. 8. 2007]. URL: <[www.turboden.it/public/Euroheat\\_ORC-Lienz-final.pdf](http://www.turboden.it/public/Euroheat_ORC-Lienz-final.pdf)>
- [2] Bahaa, S. - Koglbauera, G. - Wendlanda, M. - Fischer, J. *Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles*. [online]. [20. 8. 2007]. URL: <<http://www.sciencedirect.com/>>
- [3] Sřředa, Ivo. *Základy rovnovážné termodynamiky*. Liberec 2001. 2. vydání. ISBN 80-7083-453-6
- [4] Kunc, Jan – Novák, Libor. *Biomasa - efektivní palivo pro ORC technologii*. [online]. [20. 8. 2007]. URL: <<http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=2455>>
- [5] Kunc, Jan. *ORC technologie v realizaci (II) - Trhové Sviny, srovnání*. [online]. [20. 8. 2007]. URL: <<http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=2834>>
- [6] Schiestl s.r.o. *Výroba elektrické energie z biomasy*. [online]. [15. 8. 2007]. URL: <<http://schiestl.cz/content.php?pid=14&id=6>>
- [7] Hk energy GmbH. *Heizzentrale Schöneck*. [online]. [26. 8. 2007]. URL: <[http://www.hk-energy.de/html/orc-anlage\\_.html](http://www.hk-energy.de/html/orc-anlage_.html)>
- [8] Maxxtec AG. *Heizkraftwerk Schöneck in Betrieb*. [online]. [26. 8. 2007]. URL: <[http://www.maxxtec.net/76.0.html?&no\\_cache=1&tx\\_ttnews%5Btt\\_news%5D=286&tx\\_ttnews%5BbackPid%5D=6&cHash=abe1422af5](http://www.maxxtec.net/76.0.html?&no_cache=1&tx_ttnews%5Btt_news%5D=286&tx_ttnews%5BbackPid%5D=6&cHash=abe1422af5)>
- [9] Adoratec GmbH. *Extract of our current reference list for ORC - plants*. [online]. [26. 8. 2007]. URL: <<http://www.adoratec.com/referencenav.html>>
- [10] *Tag der erneuerbaren Energie 2007*. [online]. [8. 9. 2007]. URL: <[http://www.nuz-vogtland.de/pdf/TdeE2007\\_Beispiele.pdf](http://www.nuz-vogtland.de/pdf/TdeE2007_Beispiele.pdf)>
- [11] Hlavačka, Vojtěch. *Termická účinnost výměníků tepla*. Státní nakladatelství technické literatury, Praha – středisko interních publikací, 1988.
- [12] Maxxtex AG. *Wärmerückgewinnungen zur Luftvorwärmung*. [online]. [26. 8. 2007]. URL: <[http://www.maxxtec.net/fileadmin/Bilder/was\\_thermo3g.gif](http://www.maxxtec.net/fileadmin/Bilder/was_thermo3g.gif)>
- [13] Tzb-info.cz. *Překladový a výkladový slovník*. [online]. [20. 8. 2007]. URL: <<http://www.tzb-info.cz/t.py?t=32&i=1>>

- [14] Hrdlička, František. *Energetika - hybný motor rozvoje společnosti*. Časopis stavebnictví číslo 04/2007. vydalo Expo data s. r.o. 2007. ISSN 1802-2030
- [15] Biom.cz. *Štěpka dřevní*. [online]. [6. 7. 2007]. URL: <<http://expert.biom.cz/materialy.stm?x=1338585>>
- [16] Vysoká škola báňská. *Fyzikální vlastnosti spalín*. [online]. [6. 9. 2007]. URL: <<http://www1.vsb.cz/ke/Termo/Tabulky-sd%EDlen%ED%20II.pdf>>
- [17] Machonský, L. – Burianová, L. – Čmelík, M. *Fyzikální laboratoře*. Liberec 2007. 2. vydání. ISBN 978-80-7372-176-3
- [18] Novák, J. *Základy teorie chyb a zpracování fyzikálních měření*. [online]. [25. 8. 2007]. URL: <[departments.fsv.cvut.cz/k102/files/mereni.pdf](http://departments.fsv.cvut.cz/k102/files/mereni.pdf)>
- [19] Noskiewiřová, D., Tošenovský, J. *Statistické metody pro zlepřování jakosti*. Ostrava: Montanex a.s., 2000, ISBN 80-7225-040-X.
- [20] Trilobite, s.r.o. *Vývoj software pro statistickou analýzu*. [online]. [28. 8. 2007]. URL: <<http://www.trilobyte.cz/qewma.htm>>
- [21] Meloun, M. – Militký, J. *Kompendium statistického zpracování dat*. Praha 2002, 1. vydání. ISBN 80-200-1008-4
- [22] Bařta J. a kolektiv. *Značky pro kreslení dokumentace ve vytápění*. [online]. [6. 9. 2007]. URL: <<http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=351>>

## Přílohy

Tabulka A.1 Grafické značky armatur a uložení potrubí [22]




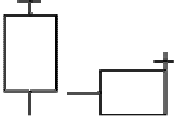

















Název	Značka
Pevný bod	
Posuvný bod	
Valivé uložení	
Suvné vedení	
Kompenzátor obecně	
U kompenzátor	
Lyra kompenzátor	
Vlnovcový kompenzátor	
Pryžový kompenzátor	
Ucpávkový kompenzátor	
Ventil obecně šikmý	
Ventil obecně přímý	
Ventil obecně rohový	
Zpětný ventil (ve směru šipky průtočný)	
Kohout přímý	
Kohout rohový	
Šoupě	
Pojistný ventil přímý	
Pojistný ventil rohový	
Trojcestná armatura obecně-ventil	




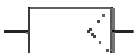




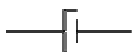




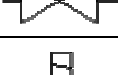
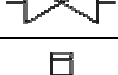
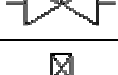
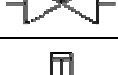

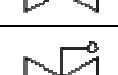
Tabulka A.1 Pokračování

Trojcestná armatura obecně-klapka	
Trojcestný směšovací ventil	
Trojcestná směšovací klapka	
Trojcestný rozdělovací ventil	
Trojcestná rozdělovací klapka	
A ... regulovaný průtok, B ... doplňovací průtok, AB ... plný průtok	
Čtyřcestný ventil	
Čtyřcestná klapka	
H napojovací armatura otopných těles - dvoutrubková sestava	
H napojovací armatura otopných těles-jednotrubková soustava	
Šroubení	
Clona	
Klapka obecně	
Uzavírací klapka	
Škrtící klapka	
Zpětná klapka	

Tabulka A.1 Pokračování

Odvzdušňovací ventil obecně	
Odvzdušňovací ventil otopného tělesa	
Vypouštění	
Odvzdušňovací nádoba	
Redukční ventil	
Membránová armatura	
Armatura s definovaným nastavením	
Přírubová armatura	
Hrdlová armatura	
Závitová armatura	
Navařovací armatura	
Regulátor tlakové difference a přepouštěcí ventil	
Regulátor průtoku	
Průhledítko	
Odlučovač plynů	
Odlučovač (separátor kapek) obecně	
Omezovač teploty vody	
Odvaděč kondenzátu obecně	
Mechanický odvaděč kondenzátu	
Termodynamický odvaděč kondenzátu	
Termostatický (termický) odvaděč kondenzátu	

Tabulka A.1 Dokončení

Filtr	
Sítový odlučovač, ev. filtr	
Chemická úprava vody	
Vpust'	
<b>Připojení armatur</b>	
Přírubový spoj	
Svarový spoj	
Spoj šroubením	
Hrdlový spoj	
<b>Ovládání armatur</b>	
Ruční ovládání	
Ovládání pohonem - obecně	
Ovládání elektromotorem	
Ovládání elektromagnetem	
Ovládání vlnovcem	
Ovládání protékající látkou	
Ovládání pístem	
Ovládání membránou	
Ovládání plovákem či závažím	
Ovládání termostatickým regulátorem	